

e-ISSN: 2782-7445

p-ISSN: 2686-7818

# **ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

---

**2023, №4 (23)**

СЕТЕВОЕ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ  
ИЗДАНИЕ

*Expert:  
theory and practice*

**12+**

**АНО «ИССТЭ»**  
Тольятти/Tolyatti



**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 раза в год.  
**Префикс DOI: 10.51608/26867818**

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

Сетевое издание «Эксперт: теория и практика» включено в **категорию К1 перечня ВАК** Минобрнауки РФ ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по научным специальностям:

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

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



©2023 Контент доступен по лицензии CC BY-NC 4.0  
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Редакционный совет:**

*ПЕТРОВ Владилен Васильевич* – председатель редакционного совета, академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

*АКИМОВ Павел Алексеевич* – академик РААСН, профессор, доктор технических наук, ректор Московского государственного строительного университета

*АХМЕДОВА Елена Александровна* – академик РААСН, доктор архитектуры, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, заведующая кафедрой «Градостроительство», Самарский государственный технический университет

*БАКУЛИНА Лилия Талгатовна* – доктор юридических наук, доцент, декан юридического факультета, Казанский (Приволжский) федеральный 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, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (Саранск, Россия)

*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 Суменович* – 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, профессор кафедры менеджмента и цифрового маркетинга, Самарский университет государственного управления "Международный институт рынка" (Самара, 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)

*ТРЕЩЕВ Александр Анатольевич* – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет

*ХАРИТОНЧИК Сергей Васильевич* – доктор технических наук, доцент, ректор Белорусского Национального технического университета (Республика Беларусь, Минск)



**Founder**

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

Published since 2019. Published 4 times a year.

**Prefix DOI: 10.51608/26867818**

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

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

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

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



©2023 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)

*Lilia T. BAKULINA* – Dr. of Law, Associate Professor, Dean of the Faculty of Law, Kazan (Volga Region) Federal University (Kazan, 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, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Building Materials and Technologies, Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia)

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

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

*Semyon S. 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 Ministry (Moscow, Russia)

*Vladimir P. SELIAEV* – 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, Professor of the Department of Management, Samara State University of Management «International Market Institute» (Samara, 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, профессор кафедры менеджмента и цифрового маркетинга, Самарский университет государственного управления "Международный институт рынка" (Самара, 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

*ЕФИМЦЕВА Татьяна Владимировна* – доктор юридических наук, доцент, заведующий кафедрой предпринимательского и природоресурсного права, Московский государственный юридический университет им. О.Е. Кутафина, Оренбургский филиал

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

*КВАНИНА Валентина Вячеславовна* – доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой «Предпринимательское, конкурентное и экологическое право», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Россия)

*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

*МИЛУШЕВА Татьяна Владимировна* – доктор юридических наук, доцент, заведующий кафедрой гражданского права и процесса, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Поволжский институт управления им. П.А. Столыпина (Саранск, Россия)

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

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

*МИХАЙЛОВ Андрей Валерьевич* – кандидат юридических наук, доцент, заведующий кафедрой Предпринимательского и энергетического права, Казанский (Приволжский) федеральный университет

*МОИСЕЕВ Александр Михайлович* – доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой Криминалистики, Донбасская юридическая академия (ДНР, Донецк)

*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, профессор кафедры строительных конструкций, 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



*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

*САЛИМОВА Татьяна Анатольевна* – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством, декан экономического факультета, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (Саранск, Россия)

*СЕРОВА Ольга Александровна* – доктор юридических наук, профессор, проректор по учебной работе, Псковский государственный университет

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

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

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

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

*СУШКОВА Юлия Николаевна* – доктор исторических наук, доцент, заведующий кафедрой международного и европейского права, декан юридического факультета, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (Саранск, 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, Director INO "IFCTE", Candidate of Economic, Dr. of Philosophy, Honorary Builder (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 Turgenev (Oryol, Russia)

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

*Tatyana V. EFIMTSEVA* – Dr. of Law, Associate Professor, Head of the Department of Entrepreneurial and Natural Resources Law, Moscow State Law University. O.E. Kutafina, Orenburg branch (Orenburg, 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)

*Valentina V. KVANINA* – Dr. of Law, Prof., Head of the Department of Business, Competition and Environmental Law, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)

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

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

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

*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)

*Tatyana V. MILUSHEVA* – Dr. of Law, Associate Professor, Head of the Department of Civil Law and Procedure, The Russian Presidential Academy Of National Economy And Public Administration (Saratov, Russia)

*Ilizar T. MIRSAYAPOV* – 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)

*Andrey V. MIKHAILOV* – PhD in Law, Associate Professor, Head of the Department of Entrepreneurial and Energy Law, Kazan Federal University (Kazan, Russia)

*Alexander M. MOISEEV* – Dr. of Law, Prof., Head of the Department of Criminalistics, Donbass Law Academy (Donetsk)

*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., Prof. of the Department of Building Structures, 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)

*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)

*Tatyana A. SALIMOVA* – Dr. of Economics, Prof., Head of the Department of Quality Management, Dean of the Faculty of Economics, Mordovia State University named after N.P. Ogareva (Saransk, Russia)

*Olga A. SEROVA* – Dr. of Law, Prof., Vice-Rector for Academic Affairs, Pskov State University (Pskov, 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)

*Yulia N. SUSHKOVA* – Dr. of Historical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of International and European Law, Dean of the Faculty of Law, Mordovia State University named after N.P. Ogareva (Saransk, 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

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| ПОЗДРАВЛЯЕМ ПИЧУГИНА АНАТОЛИЯ ПЕТРОВИЧА С 80–ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ..... | 14 |
| ПОЗДРАВЛЯЕМ ЕРЫШЕВА ВАЛЕРИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА С 75–ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ..... | 21 |

### МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| О МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ»<br>ПИЧУГИН Анатолий Петрович ..... | 25 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ КРУГЛОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА РЕЗЕРВУАРЫ ХРАНЕНИЯ КОНДИП ПЛАТФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ<br>БАШИРЗАДЕ Сеймур, ОЗДЖАН Окан, ГАРИБОВ Рафаил Баширович..... | 29 |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ В КАЧЕСТВЕ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ СРОКОВ СХВАТЫВАНИЯ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО<br>БЕРНАЦКИЙ Анатолий Филиппович, ГОЛУБЕВА Мария Борисовна .....                                        | 36 |
| ПОДБОР СОСТАВОВ ЗОЛОШЛАКОЦЕМЕНТНОЙ СМЕСИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГРУНТОБЕТОНОВ<br>БОБЫЛЬСКАЯ Виктория Александровна, МАЗГАЛЕВА Ада Владимировна, ЛЕЩЕНКО Сергей Иванович.....                            | 41 |
| НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ КРУГЛОЙ ПЛИТЫ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ<br>БОСАКОВ Сергей Викторович, КОЗУНОВА Оксана Васильевна.....                                                                                  | 47 |
| ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ СМОЛ НА ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА<br>ВОЛОЦКОЙ Алексей Николаевич, АВДОНИН Валерий Викторович .....                      | 52 |
| ВЛИЯНИЕ КАРБАМИД-СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ<br>ИЛЬИНА Лилия Владимировна, БЕРДОВ Геннадий Ильич, ДЬЯКОВА Ксения Сергеевна, КОЗОРЕЗ Дмитрий Иванович.....                      | 58 |
| ВЛИЯНИЕ ОКСИДА И ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА И КАМНЯ<br>ИЛЬИНА Лилия Владимировна, БЕРДОВ Геннадий Ильич, ТУЛЯГАНОВ Александр Константинович, ЧЕРНЫХ Тамара Николаевна.....    | 62 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ИССЛЕДОВАНИЕ КАРКАСНЫХ МЕТАЛЛОБЕТОНОВ</b><br>КАЗАКОВ Руслан Евгеньевич, ЗЮЗИН Дмитрий Алексеевич, АФОНИН Виктор Васильевич,<br>ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович.....                                                                                                                  | 68  |
| <b>ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В ЛИНЗООБРАЗНОМ ПОКРЫТИИ<br/>МЕМБРАННО-СТЕРЖНЕВОГО СООРУЖЕНИЯ</b><br>КИМ Алексей Юрьевич, АМОЯН Миша Фрикович, ХАПИЛИН Виктор Евгеньевич.....                                                                                           | 76  |
| <b>НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЛИНЗООБРАЗНЫХ МЕМБРАННО-<br/>ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ УНИВЕРСАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b><br>КИМ Алексей Юрьевич, ПОЛНИКОВ Сергей Валерьевич, ХАПИЛИН Виктор Евгеньевич.....                                                                        | 82  |
| <b>КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ С ВЫСОКОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ИСТИРАНИЮ</b><br>ПЛЕТНЕВ Петр Михайлович, СЕМАНЦЕВА Елена Сергеевна,<br>ШАХОВ Сергей Александрович.....                                                                                                                           | 89  |
| <b>ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИКАЦИИ БИТУМА НАНОДОБАВКАМИ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ НА<br/>СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКАХ</b><br>ПРИБЫЛОВ Вячеслав Сергеевич, ПИЧУГИН Анатолий Петрович.....                                                                                                                 | 95  |
| <b>НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК<br/>КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ<br/>КОНСТРУКЦИЙ</b><br>РИМШИН Владимир Иванович, СОЛОВЬЕВ Алексей Кириллович,<br>СУЛЕЙМАНОВА Людмила Александровна, АМЕЛИН Павел Андреевич..... | 101 |
| <b>ЛЕГКИЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ПОЛИКОМПОНЕНТНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ</b><br>СМИРНОВА Ольга Евгеньевна, ПИЧУГИН Анатолий Петрович,<br>ХРИТАНКОВ Владимир Федорович.....                                                                                                             | 108 |
| <b>ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОНДИЦИОННОГО СЫРЬЯ<br/>В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ</b><br>СТОЛБОУШКИН Андрей Юрьевич, ФОМИНА Оксана Андреевна, ДАШЖАМЦ Далайн.....                                                                                                          | 115 |
| <b>РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ШЛАМОВ<br/>В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b><br>ТАРАКАНОВ Олег Вячеславович, БЕЛЯКОВА Елена Александровна,<br>ФИШЕР Ханс-Бертрам.....                                                                            | 120 |
| <b>ДЕФОРМИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ,<br/>ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ МАТЕРИАЛА С ДВОЙНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ</b><br>ТРЕЩЕВ Александр Анатольевич, ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич,<br>СЕЛЕЗНЕВ Илья Романович.....                                                                   | 125 |
| <b>ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ<br/>И УПРОЧНЕНИЯ ГРУНТОВ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ</b><br>ХАРЧЕНКО Алексей Игоревич, ХОЗИН Вадим Григорьевич, ХАРЧЕНКО Игорь Яковлевич,<br>ПISKУНОВ Александр Алексеевич.....                                               | 133 |
| <b>ПОЛУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВОГРУНТОВ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЗЕМЕЛЬ<br/>ПРОМЫШЛЕННЫХ И УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ</b><br>ШАХОВ Сергей Александрович, ЛЯШЕНКО Татьяна Васильевна.....                                                                                                  | 140 |
| <b>ОПЫТ ОМСКОГО РЕГИОНА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ ТЭЦ</b><br>ЯВИНСКИЙ Александр Викторович, ЧУЛКОВА Ирина Львовна,<br>ЛЕСОВИК Валерий Станиславович.....                                                                                                                               | 144 |
| <b>РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА КАДРОВ</b><br>ЕРМОЛИНА Лилия Валерьевна, ПРОНИНА Наталья Николаевна,<br>МЕЛЬНИКОВА Дарья Александровна.....                                                                                                             | 148 |

## **МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА**

### **ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В НЕЛИНЕЙНОДЕФОРМИРУЕМОМ ТЕЛЕ.**

#### **Часть 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И СООТНОШЕНИЯ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА**

КРУГЛОВ Валерий Михайлович, БАКУШЕВ Сергей Васильевич, ШЕИН Александр Иванович,  
ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович, АЛЬ ДУЛАЙМИ Салман Давуд Салман,  
ТОМИЛОВ Антон Алишерович.....154

### **ЛИНЕАРИЗОВАННЫЕ ФОРМЫ УРАВНЕНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН**

СОКОЛОВА Марина Юрьевна, ХРИСТИЧ Дмитрий Викторович.....164

### **ГАШЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ БАШЕННОГО ТИПА С ПОМОЩЬЮ РЕАКТИВНОГО ГАСИТЕЛЯ**

ШЕИН Александр Иванович, ЗАЙЦЕВ Михаил Борисович..... 171

### **ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СТОЙКИ ИЗ ПОРИСТОГО БЕТОНА, УПРОЧНЕННОГО РАСПЛАВОМ ЖИДКОГО СТЕКЛА, С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ СМЕСЕЙ И ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ**

ШЛЯХОВ Станислав Михайлович, КРИВУЛИНА Эльвира Федоровна..... 177

## **ЭКСПЕРТНОЕ МНЕНИЕ**

### **ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ОСНОВЕ СМЕШАННЫХ ХЛАДОГЕНТОВ В РОССИИ**

АЛПАТОВ Денис Алексеевич, МЕЛЬНИКОВА Дарья Александровна,  
ЕРМОЛИНА Лилия Валерьевна..... 182

## **РЕЦЕНЗИИ**

### **РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ «ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖИЛИЩНО- КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»**

ФЕДОРОВ Виктор Сергеевич..... 188

## **РЕДАКЦИОННАЯ ЗАМЕТКА**

### **УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ «ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ».....**

190

*УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ..... 193*

## CONTENT

---

### PERSONALITIES

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| CONGRATULATIONS TO PICUGIN ANATOLY PETROVICH ON THE 80TH BIRTHDAY.....   | 14 |
| CONGRATULATIONS TO ERY SHEV VALERY ALEKSEEVICH ON THE 75TH BIRTHDAY..... | 21 |

### CONFERENCE MATERIALS

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ON THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE «NEW PROGRESSIVE<br>PRESCRIPTION-TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE»<br>PICHUGIN Anatoly Petrovich..... | 25 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### TECHNICAL SCIENCES. BUILDING AND ARCHITECTURE

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ASSESSMENT OF CIRCULAR PRESTRESSING IMPACT ON CONDEEP PLATFORM STORAGE<br>RESERVOIRS VIA MECHANICAL PRINCIPLES<br>BASHIRZADE Seymur, OZCAN Okan, GARIBOV Rafail B.....                                             | 29 |
| USE OF ACETIC ACID AS A TIMING DECELERATOR OF GYPSUM BINDER SETTING<br>BERNATSKY Anatoly Filippovich, GOLUBEVA Maria Borisovna.....                                                                                | 36 |
| SELECTION OF ASH AND SLAG CEMENT MIXTURE COMPOSITIONS<br>IN THE DESIGN OF SOIL CONCRETE<br>BOBYLSKAYA Viktoriya Alexandrovna, MAZGALEVA Ada Vladimirovna,<br>LESHCHENKO Sergey Ivanovich.....                      | 41 |
| NON-LINEAR CALCULATION OF ROUND PLATE ON ELASTIC BASE<br>BOSAKOV Sergey Viktorovich, KOZUNOVA Oksana Vasilyevna.....                                                                                               | 47 |
| THE INFLUENCE OF RESIN POLARITY ON THE DAMPING CHARACTERISTICS OF POLYMER<br>MATERIALS BASED ON ETHYLENE-VINYL ACETATE<br>VOLOTSKOY Alexey Nikolaevich, AVDONIN Valeriy Viktorovich.....                           | 52 |
| EFFECT OF CARBAMIDE-CONTAINING ADDITIVES ON CEMENT STONE STRENGTH<br>ILINA Liliia Vladimirovna, BERDOV Gennadii Ilich, DYAKOVA Ksenia Sergeevna,<br>KOZOREZ Dmitry Ivanovich.....                                  | 58 |
| INFLUENCE OF ALUMINUM OXIDE AND HYDROXIDE ON THE PROPERTIES OF CEMENT DOUGH<br>AND STONE<br>ILINA Liliia Vladimirovna, BERDOV Gennadii Ilich, TULIAGANOV Vladimir Viktorovich,<br>CHERNYKH Tamara Nikolaevna ..... | 62 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>THE RESEARCH OF FRAME METAL CONCRETE</b><br>KAZAKOV Ruslan Yevgenyevich, ZYUZIN Dmitry Alekseevich, AFONIN Viktor Vasilyevich,<br>EROFEEV Vladimir Trofimovich.....                                                                                                            | 68  |
| <b>INVESTIGATION OF CONSTRUCTIVE NONLINEARITY<br/>IN THE LENS-LIKE COATING OF A MEMBRANE-ROD STRUCTURE</b><br>KIM Alexey Yurievich, AMOYAN Misha Frykovich, KHAPILIN Viktor Evgenievich.....                                                                                      | 76  |
| <b>NONLINEAR CALCULATION OF LARGE-SPAN LENTICULAR<br/>MEMBRANE-PNEUMATIC STRUCTURES OF UNIVERSAL PURPOSE</b><br>KIM Alexey Yurievich, POLNIKOV Sergey Valeryevich, KHAPILIN Viktor Evgenievich.....                                                                               | 82  |
| <b>HIGHLY ABRASION RESISTANT COMPOSITE MATERIAL</b><br>PLETNEV Petr Mikhailovich, SEMANTSEVA Elena Sergeevna,<br>SHAHOV Sergey Alexandrovich .....                                                                                                                                | 89  |
| <b>EFFICIENCY OF BITUMEN MODIFICATION BY NANOADDITIVES<br/>IN ASPHALT CONCRETE ON STEELMAKING SLAGS</b><br>PRIBYLOV Vyacheslav Sergeevich, PICHUGIN Anatoly Petrovich.....                                                                                                        | 95  |
| <b>NEURAL NETWORK PREDICTION OF PHYSICAL-MECHANICAL<br/>CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS<br/>USED FOR STRENGTHENING BUILDING STRUCTURES</b><br>RIMSHIN Vladimir Ivanovich, SOLOVIEV Alexey Kirillovich,<br>SULEYMANOVA Lyudmila Aleksandrovna, AMELIN Pavel Andreevich..... | 101 |
| <b>LIGHTWEIGHT CONCRETE ON THE BASIS OF MULTI-COMPONENT ORGANIC AGGREGATE</b><br>SMIRNOVA Olga Evgenievna, PICHUGIN Anatoly Petrovich,<br>KHRITANKOV Vladimir Fedorovich.....                                                                                                     | 108 |
| <b>PROSPECTS OF USING NON-CONFORMING RAW MATERIALS IN CERAMIC MANUFACTURING</b><br>STOLBOUSHKIN Andrey Yurievich, FOMINA Oksana Andreevna, DASHZHAMTS Dalain .....                                                                                                                | 115 |
| <b>EXTENSION OF THE APPLICATION FIELD OF THE MINERAL SLUDGE<br/>IN CONSTRUCTION AND FINISHING MATERIALS</b><br>TARAKANOV Oleg Vyacheslavovich, BELYAKOVA Elena Aleksandrovna,<br>FISCHER Hans-Bertram.....                                                                        | 120 |
| <b>DEFORMATION OF A SPHERICAL SHELL ON AN ELASTIC FOUNDATION<br/>MADE OF A DOUBLE ANISOTROPIC MATERIAL</b><br>TRESHCHEV Alexander Anatolyevich, TELICHKO Victor Grigorievich,<br>SELEZNEV Ilya Romanovich.....                                                                    | 125 |
| <b>APPLICATION OF GEO-DIMENSIONAL BINDERS FOR COMPACTING<br/>AND HARDENING SOILS IN GEOENGINEERING</b><br>KHARCHENKO Alexey Igorevich, KHOZIN Vadim Grigorievich, KHARCHENKO Igor Yakovlevich,<br>PISKUNOV Alexander Alekseevich.....                                             | 133 |
| <b>OBTAINING ARTIFICIAL SOIL-GROUNDS FOR THE RECULTIVATION<br/>OF INDUSTRIAL AND URBAN TERRITORIES</b><br>SHAHOV Sergey Alexandrovich, LYASHENKO Tatyana Vasilievna .....                                                                                                         | 140 |
| <b>THE EXPERIENCE OF THE OMSK REGION ON THE RECYCLING<br/>OF WASTES FROM THERMAL POWER PLANTS</b><br>YAVINSKY Alexander Viktorovich, CHULKOVA Irina Lvovna,<br>LESOVIK Valery Stanislavovich .....                                                                                | 144 |
| <b>DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN CONSTRUCTION INDUSTRY<br/>UNDER CONDITIONS OF SHORTAGE OF PERSONNEL</b><br>ERMOLINA Liliya Valerievna, PRONINA Natalya Nikolaevna,<br>MELNIKOVA Daria Alexandrovna.....                                                                             | 148 |



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

### **RELATIONSHIPS BETWEEN STRESSES AND DEFORMATIONS IN A NON-LINEAR DEFORMABLE BODY. Part 1. BASIC PRINCIPLES AND RATIOS OF A SOLID DEFORMED BODY MECHANICS**

KRUGLOV Valery Mikhailovich, BAKUSHEV Sergey Vasilyevich, SHEIN Alexander Ivanovich,  
EROFEEV Vladimir Trofimovich, AL DULAIMI Salman Dawood Salman,  
TOMILOV Anton Alisherovich..... 154

### **LINEARIZED FORMS OF ELASTIC WAVE PROPAGATION EQUATIONS**

SOKOLOVA Marina Yurievna, KHRISTICH Dmitrii Viktorovich..... 164

### **DAMPING OF SEISMIC VIBRATIONS OF TOWER-TYPE STRUCTURES USING A JET EXTINGUISHER**

SHEIN Alexander Ivanovich, ZAITSEV Mikhail Borisovich ..... 171

### **ASSESSMENT OF STABILITY OF A RACK MADE OF POROUS CONCRETE, STRENGTHENED WITH MELT LIQUID GLASS FROM THE STANDARD OF THE THEORY OF MIXTURES AND THE THEORY OF PROBABILITY**

SHLYAKHOV Stanislav Mikhailovich, KRIVULINA Elvira Fedorovna..... 177

## **EXPERT OPINION**

### **ADVANTAGES OF APPLICATION OF NATURAL GAS LIQUEFACTION TECHNOLOGIES BASED ON MIXED REFRIGERANTS IN RUSSIA**

ALPATOV Denis Alekseevich, MELNIKOVA Daria Alexandrovna,  
ERMOLINA Liliya Valerievna ..... 182

## **REVIEWS**

### **REVIEW ON THE TEXTBOOK "INFORMATION MODELING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MODERN CONSTRUCTION AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES"**

FEDOROV Viktor Sergeevich..... 188

## **EDITORIAL NOTE**

### **TEXTBOOK "INFORMATION MODELING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MODERN CONSTRUCTION AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES"..... 190**

*CONDITIONS FOR POSTING MATERIALS..... 193*

### ПОЗДРАВЛЯЕМ ПИЧУГИНА АНАТОЛИЯ ПЕТРОВИЧА С 80–ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ



Редакционный совет, редакционная коллегия сетевого научно-практического издания «ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» поздравляет с 80-летием Пичугина Анатолия Петровича – активного автора, известного учёного-практика, писателя, доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника Новосибирского государственного аграрного университета, основателя научной школы, Заслуженного работника Высшей школы Российской Федерации, Почетного работника Агропромышленного комплекса РФ, Почетного работника Высшего профессионального образования РФ, председателя оргкомитета и главного редактора проводимых на протяжении 45 лет под его руководством ежегодных Международных научно-технических конференций и форумов, члена Союза писателей, члена Союза журналистов России, академика РАЕН и АПК.

Пичугин Анатолий Петрович родился 22 октября 1943 г. в городе Уссурийск Приморского края.

#### **Образование**

Окончил Дальневосточный политехнический институт им. В.В. Куйбышева в 1968 году по специальности – «Промышленное и гражданское строительство», инженер-строитель.

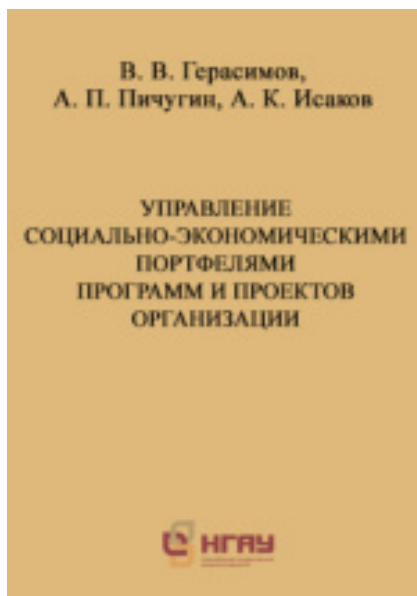
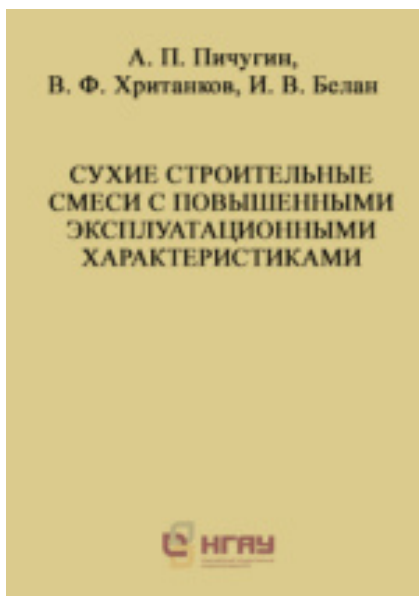
По окончании аспирантуры при Московском инженерно-строительном институте им. В.В.

Куйбышева (МИСИ) в 1974 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Полимербетонные покрытия полов для сельскохозяйственных и производственных помещений».

В 2000 году, по результатам научных исследований, защитил диссертации на соискание ученой степени д.т.н. на тему «Коррозионно-стойкие материалы для полов и ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий».

#### **Основные этапы трудовой и научной деятельности**

По окончании ВУЗа был принят на работу в трест «Жилстрой-1» ГлавВладивостокСтроя на должность прораба. В дальнейшем Анатолий Петрович по настоящее время посвятил себя научной и педагогической деятельности для агропромышленного комплекса страны. Начиная с должности научного сотрудника отраслевой научно-исследовательской лаборатории строительных материалов ДВПИ, затем: старшим преподавателем, доцентом кафедры оснований фундаментов и строительного дела Приморского сельскохозяйственного института, заведующим кафедрой охраны труда и строительного дела Дальневосточного технологического института. С 1978 года – в Новосибирском сельскохозяйственном



институте (НГАУ) – зав. кафедрой Строительного дела, проректор, более 15 лет на должности декана вновь созданного факультета Государственного и муниципального управления. В настоящее время – Главный научный сотрудник Новосибирского государственного аграрного университета.

**Профессиональная научная и творческая деятельность**

Невозможно переоценить вклад Анатолий Петрович в развитие строительной науки в агропромышленном комплексе нашей страны в области его научных интересов и исследований:

- повышение долговечности зданий и сооружений сельскохозяйственного назначения;
- применение полимерных материалов для полов и ограждающих конструкций животноводческих помещений;
- использование отходов и местного сырья для производства эффективных материалов и изделий;

– методология получения коррозионно-стойких материалов на основе отходов производства и местного сырья путем направленного изменения их диффузионных показателей и модифицирования полимерными составами и нанодобавками;

– разработка эффективных конструктивных решений полов и стен зданий, средств их оперативной диагностики, рецептов и технологии их изготовления;

– создание долговечных материалов повышенной эксплуатационной надёжности и др.

Под руководством д.т.н., профессора Пичугина А.П. коллективом исследователей создана научная школа. Потенциал научной школы обеспечил выполнение фундаментальных и прикладных научных исследований для воспроизводства научного потенциала государства, получения новых знаний, развития науки и технологий, внедрения результатов научных исследований учителя в



реальный сектор экономики. Результаты научно-исследовательской деятельности научной школы отражены в защищенных 3 докторских и 24 кандидатских диссертациях, в более 1000 опубликованных научных работах, учебниках и учебных пособиях, в их числе 42 монографии и 45 авторских свидетельств и патентов.

Кроме того, Анатолий Петрович, творческий, наблюдательный человек, увлекательный рассказчик, общителен, участлив, всегда и всем помогает добрым советом или бескорыстными делами. У него много друзей, учеников и поклонников. Он посетил много городов и стран, о чём непременно рассказывает в своих художественных произведениях, стихах, поэмах и рассказах.

Анатолий Петрович гармоничная, многогранная личность: всесторонне развит, эрудирован, обладающий всесторонними интересами и знаниями, постоянно стремящийся расширить свой кругозор, проявляющий себя в разных направлениях и областях жизни, добившийся созидательных результатов в науке, знает литературу, пишет романы, повести, стихи и рассказы, играет на музыкальных инструментах, подкован в философии, замечательно готовит и мастерски управляет автомобилем. Юбиларом написано и издано более тридцати книг стихов и рассказов.

Анатолий Петрович прекрасный семьянин – у него трое детей, одиннадцать внуков и правнук.

Ниже публикуем новую поэму юбиляра.





*А.П. Пичугин*  
(Анатольев)

## ГАРМОНИЯ

*Поэма*



Гармония – прекрасное словечко;  
Обозначает совпадение чувств,  
Как к дому обязательно крылечко,  
Как темы для Божественных искусств.

Гармония – согласие и стройность,  
И чёткость соответствия во всём;  
Порою восхищенье и покорность  
Пред красотой, что видим ярким днём...

Ещё ей называют соразмерность,  
Которая для взгляда хороша,  
И может для народа стать примерность,  
Коли всегда в гармонии душа!

Гармония созвучие диктует  
И бережёт от какофоний слух;  
Недаром испокон веков бытует,  
Что гармонист в деревне стоит двух!

Есть целое, об этом каждый знает!  
И части, коль объём весь разделить,  
Должны соотноситься не по краю,  
А в соразмерном отношении быть...

И правильное это отношение  
Из звуков и материальных тел  
Гармонией повеет при общении  
И стимул даст к ведению всех дел!

Ещё сложнее аккордам и оркестрам –  
Десятки звуков разной частоты,  
Когда в ходу до сотни инструментов  
Одновременно прозвучать должны!

Тогда вот без гармонии не дело!  
Нужна она, чтоб цельность сохранить;  
Чтоб слаженно и четко, и умело  
Звучали все, храня тематик нить...

Людские гармоничны отношения,  
Когда сойдутся две души в любви  
И для всего наступит отрешенье,  
На верность будет клятва на крови!

А, если заиграет вдруг гармошка,  
То непременно ноги в пляс пойдут,  
Мелодии тех песен понемножку  
На сердце отклик радостный найдут...





И гармоничны станут все детишки,  
И лепет их, и первые слова:  
И «мама-папа», и листанье книжки,  
И их любовь за то, что жизнь дана...

Ещё он отличает ловко вкусы:  
Солёное иль сладко языку;  
И может приготовить те искусства,  
Что ароматны и вкусны во рту...

А как прекрасен голос человека –  
Гармония тут полная во всём –  
Поют профессионалы и абрики  
О жизни темы, да, и обо всём...

Есть голоса, что трели соловьины;  
Басы есть и, конечно же, альты;  
И баритоны также несравнимы,  
И тенора - различной высоты...

В гармонии той есть большая радость  
И чувство умиления, и восторг...  
И на душе, тогда как будто сладость –  
Для тех гармоний не уместен торг!

Гармонии Божественна природа –  
Как гармонично сделан Человек!  
Силён он независимо от рода,  
Наукам ускоряет дивный бег;

Имеет силу и глазами видит,  
И слышит звуки разной высоты;  
И нюхом оснащён – он не обидит,  
Не подведёт средь газовой среды...

Способность человек ещё имеет  
Все, осязая, чётко понимать:  
Что мягко, что тепло и что острее,  
Шероховатей иль ровнее гладь...

А как балет красив и гармоничен!  
Как кртят танцовщицы фуэте!  
И танец так порою мелодичен,  
Что только слезы от таких пике...

Как гармоничны птицы все в полёте  
И ищут так воздушную волну!  
Великолепны, кажется, на взлёте  
И камнем вниз – презрев свою мечту...

Как пеленою стелятся туманы,  
Как закрывают воду и поля,  
И горные вершины, как саваном  
Накроют, чтоб открыть потом, любя...

Какими тогда кажутся деревья;  
Волшебным миром предстает пейзаж...  
И это всё в Гармонии с Вселенной,  
И это всё, как сказочный мираж...

Но, вот, туман рассеется под солнцем  
И на круги своя вернется всё ...  
И засияет каждое оконце,  
И обогреет каждое жильё...

Жизнь на Земле устроена отлично:  
Есть ночь и день, и радостный рассвет,  
И есть закат, что также гармонично  
Заканчивает яркий солнца свет...

И есть зима и летних красок лето,  
И пробуждение радостной весны;  
И осени итоги и рассветы,  
И с крепкими морозами зимы...

Всё планомерно движет друг за другом  
Волшебник, что придумал эту жизнь,  
И человек доволен этим кругом,  
Сезонами, ликуя, дорожит...





Как гармоничен свет от солнца льётся!  
Ведь, ежели его чуть преломить,  
То он на семь соцветий разовьётся  
И будет радугой-дугой светить...

Луна и солнце – это ли не диво?  
Одно в огне, другое в серебре -  
Так это замечательно красиво!  
Как гармонично «шепчет» о добре...

А, если взять все дальние пространства  
И заглянуть за межпланетный брег,  
То можно обнаружить постоянство –  
Гармоний бесконечности разбег...

Божественен и небосвод над нами,  
В Гармонии и неба синева;  
Не описать ту красоту словами –  
Она так удивительно мила!

Но, если облака ещё повсюду  
И клочья «ваты» этой в синеве,  
То, кажется, что сам Господь оттуда  
Распространяет блага по земле...

Однако, коли тучами закроет  
Весь небосвод и ветер набежит,  
То тут уж нам Гармония откроет –  
Расскажет, что такое Бог и жизнь...

Дожди пройдут и снова просветленье,  
Впитает влагу добрая земля...  
И наступает в мире очищенье –  
Вот так живём в Гармонии, друзья!

Так будем мы гордиться, все земляне,  
Что гармонично наш устроен мир;  
Что небо над горами и полями – Природы  
замечательный кумир!...

2023 г.







***Уважаемый Анатолий Петрович!***

*От всей души поздравляем Вас с замечательным ЮБИЛЕЕМ!*

*Желаем Вам крепкого здоровья, радостного настроения, новых творческих проектов и успехов в их реализации, неувядаемого оптимизма, стойкости и юмора, активности и благополучия в жизни!*

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

**CONGRATULATIONS TO PICUGIN ANATOLY PETROVICH  
ON THE 80<sup>TH</sup> BIRTHDAY**

The Editorial Board and the Editorial Panel of the network scientific-practical journal "EXPERT: THEORY AND PRACTICE" congratulate Pichugin Anatoly Petrovich on his 80th anniversary. Pichugin Anatoly Petrovich is an active author, renowned scientist-practitioner, writer, doctor of technical sciences, professor, chief researcher of the Novosibirsk State Agrarian University, founder of the Scientific School, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of the Agro-industrial Complex of the Russian Federation, and Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation. He is also Chairman of the Organizing Committee and Chief Editor of the annual International Scientific and Technical Conferences and Forums that have been held for 45 years under his supervision. Pichugin Anatoly Petrovich is a member of the Writers' Union, Member of the Union of Journalists of Russia, academician of the Russian Academy of Natural Sciences and Agro-industrial Complex.

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



## ПОЗДРАВЛЯЕМ ЕРЫШЕВА ВАЛЕРИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА С 75–ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ

Редакционный совет, редакционная коллегия сетевого научно-практического издания «ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» поздравляет с 75-летием, члена редколлегии, активного автора, известного учёного–практика, доктора технических наук, профессора Тольяттинского государственного университета, Почетного работника высшего образования Ерышева Валерия Алексеевича.

### *Из автобиографии*

Родился 13.09.1948 года в с. Васильевка, Борского района Куйбышевской области.

После окончания очной аспирантуры Куйбышевского инженерно-строительного института и защиты кандидатской диссертации в 1983 году по специальности: «Строительные конструкции, здания и сооружения» и уже более 40 лет трудовая деятельность связана с Тольяттинским государственным университетом.

### *Основные этапы трудовой и научной деятельности*

В.А. Ерышев начинал трудовую деятельность с должности ст. преподавателя кафедры «Строительные конструкции и архитектура» Тольяттинского политехнического института, а после избрания по конкурсу 1985 года работал доцентом. В эти годы при непосредственном участии юбиляра в институте создается испытательная лаборатория строительных конструкций, открывается аспирантура по специальности и продолжаются исследования по разработке методов расчета железобетонных стержневых и плитных конструкций при сложных режимах нагружения, включая повторные и знакопеременные нагрузки. Для практического решения и реализации поставленных задач по заданной тематике, под руководством Валерия Алексеевича основана научная школа, которая в последствии признается РААСН одной из ведущих школ, по данному направлению исследований в стране.

Результаты научных исследований послужили для подготовки и успешной защиты в 1997 году диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Валерием Алексеевичем в диссертационном совете НИИЖБ на тему «Метод расчета деформаций железобетонных стержневых и плитных конструкций при повторных, знакопеременных и других видах сложного нагружения». В последствии, были успешно защищены диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения учениками

юбиляра: Кузнецовым А.В., Тошиным Д.С. и Латышевой Е.В.

Отметим, что это были первые и единственные защиты диссертаций по главной строительной специальности, с периода создания строительного факультета в ТПИ по планам подготовки кадров высшей квалификации.

В 1998 г. Валерий Алексеевич был избран советником РААСН, а в 1999 г. решением президиума РААСН он назначается руководителем вновь созданного ГУ Поволжский академический НТЦ РААСН «ВолгаАкадемЦентр». Таким образом, установлено многолетнее научное, творческое сотрудничество Тольяттинского ВУЗа с ведущей академией страны, градообразующими предприятиями и предприятиями строительного комплекса города.

Под руководством В.А. Ерышева, выполняются научно-экспериментальные исследования и обследования строительных конструкций по программам реконструкции и технического перевооружения производственных объектов на Волжском автозаводе, Тольяттиазоте, Куйбышевазоте, Волгоцеммаше и других предприятиях города. В исследованиях активно участвовали студенты, аспиранты строительного института. Были разработаны и изготовлены уникальные, не имевших аналогов стенды, для проведения исследований различных способов нагружения строительных конструкций. Испытательные стенды защищены пятью патентами РФ на изобретения.

В Тольятти, организуемые научным центром, проводились всероссийские семинары и конференции по обмену опытом по проводимым научным исследованиям, с участием членов РААСН – авторов генерального плана города, проекта Волжского автомобильного завода и химических предприятий.

По контрактам с мэрией и предприятиями г. Тольятти были выполнены ответственные и значимые для города и области исследования. В рамках бюджетного финансирования:

- с 2008 г. проводятся научные исследования по заданию НИИСФ, темы которых входят в план фундаментальных научных исследований РААСН, и ежегодно обсуждаются на НТС строительного отделения РААСН;

- выполнен проект РФФИ за №09-08-13569 - Конкурс целевых ориентированных фундаментальных исследований в 2009 – 2010г.;

- ведутся исследования по тем. планам Минобрнауки.



Многолетняя научно-исследовательская деятельность с участием членов РААСН, результаты которых были внедрены в практическую деятельность по проектированию общественных и жилых зданий, по оценке остаточного ресурса эксплуатации строительных конструкций и разработке научно обоснованных методов их восстановления после воздействий нагрузок техногенного характера на предприятиях города и по заданию руководства города.

Полученные результаты исследований прошли широкую апробацию и достаточно полно опубликованы в изданиях рекомендуемых ВАК РФ. Валерием Алексеевичем опубликовано в ведущих отечественных и зарубежных изданиях более двухсот работ, поучено более двух десятков патентов на изобретения, изданы три монографии.

С созданием Тольяттинского государственного университета и перевода строительного факультета в статус института, В.А. Ерышев основал в 2005 году новую кафедру «Городское строительство и хозяйство» с последующим развитием архитектурного направления и утвержден в должности заведующего этой кафедры.

В 2006 году Ерышев В.А. назначается на должность директора инженерно-строительного института. Затем руководство ВУЗа предложило юбиляру организовать и возглавить магистратуру.

Юбиляру предстояло самостоятельно выбрать направление подготовки, подобрать учебные дисциплины, разработать учебные планы, определиться с темами магистерских диссертаций и кадровым обеспечением. Все же главным в профессиональной деятельности Валерия Алексеевича остается уважение к студентам, желание передать молодым людям знание и опыт, научить творческому подходу в работе и любви к выбранной профессии созидателя.

В настоящее время по приказу Рособрнадзора №1902 является членом диссертационного совета Д 212.077.01 при Казанском государственном архитектурно-строительном университете.

За многолетнюю плодотворную работу, активную деятельность в области научных исследований, за значительный вклад в развитие строительной отрасли и подготовку специалистов, Валерий Алексеевич многократно отмечается почетными грамотами мэра, губернатора Самарской области, дипломом РААСН по результатам конкурса на лучшие научные и творческие работы в области архитектуры, градостроительства и строительных наук за работу: «Исследование, проектирование и строительство ширококорпусных жилых домов в г. Тольятти».

Валерий Алексеевич, от всей души поздравляем Вас с замечательным ЮБИЛЕЕМ!

Желаем Вам крепкого здоровья, радостного настроения, новых творческих проектов и успехов в их реализации, неувядаемого оптимизма, стойкости и юмора, активности и благополучия в жизни!

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



**Уважаемый  
Валерий Алексеевич!**

*Огромное счастье поздравлять близкого мне человека, учителя, наставника, со столь весомым Юбилеем, у которого я перенимаю бесценные знания и опыт жизненно важной науки – служению строительной отрасли, семье, людям, Родине! Именно с таким чувством я поздравляю Вас, уважаемый Валерий Алексеевич, с Вашим 75-летием!*

*Эта страничка жизни особенная, когда подводится итог достигнутым результатам. А Вам есть чем гордиться!*

*Вы с ранних лет познали труд. Ваша жизнь, в значительной её части, связана с Тольяттинским государственным университетом.*

*Вы являетесь основателем создания в Тольятти кафедры «Городское строительство и хозяйство», основателем и экспертом НТЦ РААСН «ВолгаАкадемЦентр».*

*Вся Ваша жизнь – трудовой подвиг! Вы посвятили себя служению науке и преподавательской деятельности, готовите кадры высшей квалификации, любите своих учеников, которые вышли на высокий профессиональный уровень, которые стали проводниками Ваших идей, в профессии строителя.*

*Знаю Вас не только как признанного ученого, д.т.н., профессора, советника РААСН, профессионала строительной науки и отрасли, но и как мудрого, старшего товарища. При этом Вы удивительно скромный, бескорыстный человек, что в настоящее время является редкостью.*

*Вы образцовый семьянин, глава династии строителей. Ваши дети, внуки являются Вашими продолжателями служения людям, даря им здоровье, теплоту, красоту и уют.*

*Мне везет на хороших людей. Я благодарен судьбе, которая связала нас с Вами по жизни, что Вы приняли меня в состав Вашей профессиональной команды.*

*Мне остается Вам только пожелать, чтобы это профессиональное и житейское счастье не отворачивалось от Вас долгие, долгие годы. Чтобы Вы, родные, близкие Вам люди были здоровы и благополучны. И чтобы всегда рядом с Вами были Ваши близкие, Ваши друзья, Ваши соратники и ученики, к которым, я искренне надеюсь, Вы причисляете и меня.*

**С глубоким уважением,  
Ваш благодарный ученик  
д.т.н., профессор НГАСУ (Сибстрин),  
советник РААСН**

**С.М. Анпилов**



**CONGRATULATIONS TO ERY SHEV VALERY ALEKSEEVICH  
ON THE 75<sup>TH</sup> BIRTHDAY**

The Editorial Board and the Editorial Panel of the network scientific-practical journal "EXPERT: THEORY AND PRACTICE" congratulate Eryshev Valery Alekseevich on his 75th anniversary. Eryshev Valery Alekseevich is the member of the editorial board, the active author, the renowned practical scientist, the doctor of technical sciences, the professor at Tolyatti State University, and the honorary worker of higher education.

We wish you good health, a joyful mood, new creative projects and success in their implementation, indelible optimism, resilience, humor, activity and well-being in life!

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

***Dear Valery Alekseevich!***

*It is a great pleasure to congratulate someone close to me, the teacher, the mentor, on such an important anniversary, from whom I take invaluable knowledge and experience of vital science - service to the construction industry, family, people, and homeland. It is with this feeling that I congratulate you, dear Valery Alekseevich, **on your 75th anniversary!***

***With all due respect,  
Your grateful student doctor of technical sciences,  
professor at NSUACE (Sibstrin), councilor RAACS***

***S.M. Anpilov***

Материалы конференций

УДК 69

ГРНТИ: 67 Строительство. Архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения; 2.1.5 Строительные материалы и изделия; 2.1.9. Строительная механика; 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_25

### О МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ»

© Авторы 2023

SPIN: 6626-3274

AuthorID: 409255

**ПИЧУГИН Анатолий Петрович**

Председатель оргкомитета Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении», доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник

*Новосибирский государственный аграрный университет  
(Россия, Новосибирск, e-mail: gmunsau@mail.ru)*

С 18 по 21 июля 2023 года в конференц-зале спортивно-оздоровительного комплекса «Бухта Лазурная» ООО «Карачинский источник» (озеро Чаны Новосибирской области) состоялась Международная научно-практическая конференция «**Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении**», в качестве организаторов которой выступили: Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Объединенная редакция научно-технических журналов «Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®, Российская академия естественных наук (РАЕН), Академия проблем качества (АПК).

Тематика конференции предусматривала следующие направления: Современные инновационные строительные материалы, Новые технологические решения в материаловедении, Использование нанодобавок для повышения качества строительных композитов, Практические примеры внедрения новых материалов и технологий в строительстве, Контроль качества строительных материалов и изделий.

При подготовке к проведению конференции приняло участие более пятидесяти организаций и учреждений научно-образовательного и производственного профиля.

Открыл пленарное заседание председатель оргкомитета д.т.н., проф. **А.П. Пичугин**, который поблагодарил всех участников за прибытие на конференцию, пожелал успешной работы данному мероприятию и предоставил слово для приветствия от организаторов - ректору Новосибирского

государственного архитектурно-строительного университета д.т.н., проф., чл.-кор. РААСН **Ю.Л. Сколубовичу**. Юрий Леонидович не только поприветствовал участников конференции, но и сделал обширное сообщение о роли науки при подготовке кадров для строительной отрасли. Он предложил формирование новых структурных изменений при подготовке инженерных кадров в совокупности с отраслевыми научными и проектными организациями, что, по мнению докладчика, позволит перейти на новый уровень компетенций как в строительстве, так и в строительном материаловедении.

От имени руководства Новосибирского государственного аграрного университета выступил д.т.н., проф. **А.С. Денисов**, также поблагодаривший участников конференции за прибытие на данное мероприятие. Александр Сергеевич рассказал о проблемах в аграрном строительстве, связанных с наличием широкой гаммы эксплуатационных, технических и технологических особенностей. Также отметил сложности для современной материаловедческой науки, особенно при внедрении полезных разработок в практику строительных организаций.

От принимающей стороны с докладом о лечебно-оздоровительном комплексе «Бухта Лазурная» и курорте «Озеро Карачи» выступил генеральный директор ООО «Карачинский источник» д.т.н., проф. **В.Ф. Хританков**. Он рассказал историю появления и становления этих комплексов и формирование их в качестве спортивно-оздоровительных учреждений. Отдельно Владимир Федорович остановился на природных и климатических факторах курорта «Озеро Карачи» и





удивительных лечебных свойствах рапы (солевого раствора), иловой грязи, минеральной воды «Карачинская», йодо-бромном источнике и пр. На показанных слайдах был прослежен весь путь становления курорта от развалин в ходе перестройки до одной из лучших здравниц России в настоящее время.

Первый доклад по программе пленарного заседания **«Эффективные тенденции в совершенствовании строительных материалов и изделий»** был сделан д.т.н., проф. **А.П. Пичугин** (содокладчики – д.т.н., проф. **В.Ф. Хританков** и д.т.н., проф. **А.С. Денисов**), который представил обширный обзор современных мировых достижений и тенденций в области строительных материалов и изделий. Около тридцати новинок с фотографиями и краткими технологическими характеристиками были предоставлены слушателям. Особенно заинтересовали такие материалы, как самовосстанавливающийся и гибкий бетон, гибкая и прозрачная древесина, гидрокерамика, прозрачный алюминий, светопрозрачный бетон, хвойные панели, ультра-белая краска с полным отражением тепловых потоков, гибкая керамика, жидкий гранит и др. В целом доклад вызвал большой интерес и был встречен с большим одобрением.

С докладом **«Новые требования к научным публикациям и пути улучшения издательской деятельности»** выступила главный редактор журналов «Строительные материалы» и «Жилищное строительство» **Е.И. Юмашева**. Елена Ивановна рассказала о многих проблемах, связанных с выпуском научно-технических изданий, современном состоянии выживания журналов, отсутствием поддержки со стороны государственных и муниципальных структур в области просвещения практических и научных достижений в области материаловедения при подготовке строительных кадров.

О дефектах шлюзовых сооружений из бетона и железобетона и рациональных путях их устранения сделал доклад д.т.н., проф. **Ю.И. Бик** (содокладчик – **О. Шаталова**) **«Дефекты материалов шлюзовых сооружений Сибири и новые подходы к их устранению»**. На многочисленных слайдах авторы показали состояние бетонных сооружений речных шлюзовых и причальных объектов. В ходе доклада были предложены варианты устранения полученных дефектов и способы реализации их на практике действующих шлюзов. В качестве одного из вариантов рекомендуемых авторами, принята пропитка полимерсиликатными составами с наноразмерными добавками.

С большим теоретическим докладом по проблемам модификации полимерных строительных материалов выступил д.т.н., проф. **В.Г. Хозин** (содокладчики – д.т.н., проф. **Низамов Р.К.**, д.т.н., проф. **Л.А. Абрахманова**) **«Передовые методы модификации полимеров для обеспечения качества выпускаемых изделий»**. Докладчик осветил современные тенденции модифицирования полимерных материалов на основе новейших достижений науки и практики с привлечением

современных методов исследований не только надмолекулярной структуры полимеров, но и с учетом взаимодействия на атомном и нано- уровне. Такой подход позволяет создавать материалы с заданными характеристиками и обеспечивать их длительную эксплуатационную надежность. Кроме того, такие материалы открывают новые направления в применении, что особенно важно в условиях импортозамещения.

О рациональных способах ведения монолитного домостроения в оставаемых металлических опалубках сделал доклад д.т.н., проф. **С.М. Анпилов** (содокладчик – академик РААСН, д.т.н., проф. **В.Т. Ерофеев**) **«Рациональные подходы к использованию металлических профилей и активных минеральных вяжущих в монолитном домостроении»**. В докладе поэтапно были продемонстрированы возможности монолитного бетона в новых условиях создания специальных тонкостенных металлических профилей. При минимальных расходах бетона и арматуры создаются легкие несущие конструкции, воспринимающие нормативные нагрузки, превосходящие по эффективности традиционные варианты пролетных элементов. На наглядных примерах были показаны объекты, возведенные за несколько недель, что по сравнению с типовыми проектами сокращало сроки строительства в несколько раз.

В докладе к.т.н., доц. **А.В. Пчельникова** (содокладчики - д.т.н., проф. **Пичугин А.П.**, д.т.н., проф. **Шинкевич Е.С.**) **«Принципы повышения качества защитных полимерсодержащих покрытий»** раскрыта роль наноразмерных добавок в широкой гамме их использования. Показано, что, благодаря нанодобавкам, можно получать защитные покрытия, отвечающие широкому спектру требований, обладающие повышенной адгезией, огнестойкостью, износостойкостью, способностью к защите от тепловых, радиационных и агрессивных воздействий. Такие материалы очень востребованы в различных отраслях народного хозяйства, в т.ч. при эксплуатации зданий и сооружений в условиях сурового сибирского климата.

О новых технологических возможностях влияния на свойства силикатных материалов сделал доклад д.т.н., проф. **Верещагин В.И.** (содокладчики - д.т.н., проф. **Бердов Г.И.**, д.т.н., проф. **Пухаренко Ю.В.**,

д.т.н., проф. **Ганиев А.Г.**) **«Структурные преобразования в силикатных композитах при воздействии технологических факторов»**. В докладе проанализированы различные технологические аспекты воздействия на силикатные изделия в ходе приготовления сырьевой массы и способов формирования изделий с заданными рецептурно-технологическими параметрами. Отдельно докладчик коснулся микроструктуры получаемых композитов и их формированию в ходе технологических операций.

О возможностях использования отходов и сырья растительного происхождения сделала доклад к.т.н.,



доц. **Смирнова О.Е.**, (содокладчики - д.т.н., проф. **Пичугин А.П.**, д.т.н., проф. **Бернацкий А.Ф.**) **«Легкие бетоны и теплоизоляционные материалы на основе растительного сырья и органических отходов»**. В докладе приведены все органические отходы и материалы растительного происхождения; дана общая характеристика и составлена классификация о возможности их использования для получения теплоизоляционных и конструкционных материалов. На практических примерах приведены варианты получения и использования растительного сырья в качестве эффективных тепло- и звукоизоляционных изделий, что позволит восполнить дефицит в этих важных материалах.

Д.т.н., проф. **Бурьянов А.Ф.** (с содокладчиками – д.т.н., проф. **В.С. Лесовик**, д.т.н., проф. **Ильина Л.В.**, д.т.н., проф. **Duinkherjav Yagaambuyan**) в докладе **«Материалы на основе искусственных минеральных вяжущих и пути обеспечения их качества»** заострил своё внимание на крупнотоннажных отходах фосфогипса и показал пути его эффективного использования. Опыт современных отечественных и зарубежных ученых позволяет максимально использовать во многих случаях при замене дефицитного гипсового вяжущего. Положительные примеры практического использования этого бросового сырья в строительной индустрии позволяют сэкономить миллионы бюджетных средств.

Интереснейший доклад о получении и применении высокопрочного бетона сделала организатор фирмы «3D-бетон» **Я.А. Санягина** (содокладчики – к.т.н., доц. **С.В. Ананьев**, академик РААСН, д.т.н., проф. **В.Т. Ерофеев**) **«Исследование составов и свойств высокопрочных бетонов конструкционного и декоративного назначения»**. Доклад сопровождался большим количеством иллюстративного материала с анализом методов получения высокопрочных бетонов и получением и практическим применением в различных сферах использования. Такие материалы очень востребованы народным хозяйством и за ними, несомненно, будущее. А положительный опыт фирмы «3D-бетон» только укрепляет эту уверенность.

Доклад **«Перспективные цветные легкие (до 800 кг/м<sup>3</sup>) фибропенобетоны высокой прочности (300кг/см<sup>2</sup> и более) на основе пенокерамики с контролируемым вовлечением макровоздуха»**, сделанный к.т.н., доц. **С.В. Ананьевым** (содокладчик - **М.С. Ананьев**), посвящен новым теплоизоляционным материалам с повышенными прочностными показателями на основе фибропенобетона и пенокерамики. Получение материалов с такими характеристиками явление достаточно смелое и интересное, т.к. данные изделия позволяют существенно снизить материалоемкость при возведении зданий и обеспечить длительную

эксплуатационную пригодность за счет начальных высоких показателей прочности.

О целенаправленном использовании наполнителей и различных добавок сделал доклад директор завода «Колорит» **Туляганов А.К.** (содокладчик - д.т.н., проф. **Ильина Л.В.**) **«Влияние наполнителей и добавок на свойства цементных строительных смесей»**. В докладе проанализированы различные минеральные добавки, позволяющие снизить водопотребность цементных строительных смесей, что повышает прочностные качества и обеспечивает экономию дорогостоящего цементного вяжущего.

В докладе д.т.н., проф. **Белана В.И.** (с содокладчиками - д.т.н., проф. **Себелев И.М.**, к.т.н., доц. **Пчельников А.В.**) **«Новые методы, приборы и оборудование для контроля качества строительных материалов, изделий и конструкций»** рассмотрены проблемы обеспечения качества строительных материалов, изделий и конструкций. Приведен ряд характерных нарушений, снижающих качество строительства. Особое место отведено приборному и методическому оснащению при определении качества отдельных видов сырья, материалов и строительных работ.

В перерывах между выступлениями на пленарном заседании участники конференции могли ознакомиться со стендовыми докладами, которые были расположены в зале заседаний на специальных стендах.

Кроме научно-теоретической части конференции участникам были предложены экскурсии на завод минеральной воды с автоматическими линиями, выпускающими более тридцати наименований газированных напитков и минеральных вод, а также посещение курорта «Озеро Карачи» с посещением всех объектов данного лечебно-оздоровительного учреждения. Для участников конференции была предоставлена экскурсия по озеру Чаны с наблюдением за гнездовьями пеликанов, вечерние концертные программы, купание в соленой озерной воде, катание на гидроциклах и пр.

Большинство участников конференции выразили благодарность организаторам за четкое и умелое проведение научно-практического мероприятия и, в первую очередь хозяйну-организатору, генеральному директору ООО «Карачинский источник» д.т.н., проф. **Владимиру Федоровичу Хританкову**.

В ходе обсуждений было принято решение о необходимости регулярного проведения подобных научных форумов, а доклады, сделанные на конференции, были рекомендованы для публикации в научно-технических журналах «Жилищное строительство», «Строительные материалы», «Эксперт: теория и практика», «Известия вузов. Строительство».



Conference materials

## ON THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE «NEW PROGRESSIVE PRESCRIPTION-TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE»

© The Author(s) 2023

**PICHUGIN Anatoly Petrovich**

Chairman of the Organizing Committee of the International Scientific-Practical Conference «New progressive prescription-technological solutions in building materials science», Doctor of Technical Sciences, Professor

*Novosibirsk State Agrarian University*

*(Russia, Novosibirsk, e-mail: gmunsau@mail.ru)*

From July 18 to 21, 2023, in the conference hall of the sports and recreation complex "Buhta Lazurnaya" Ltd. "Karachinskiy Istochnik" (Lake Chany of the Novosibirsk region) held the international scientific and practical conference "NEW PROGRESSIVE PRESCRIPTION AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE", organized by: Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk State University of Architecture and Construction, United Edition of Scientific and Technical Journals "Housing Construction" and "Building Materials", Russian Academy of Natural Sciences, Academy of Quality Problems.

The conference topics included the following areas: modern innovative building materials; new technological solutions in materials science; the use of nano-additives to improve the quality of construction composites; practical examples of the introduction of new materials and technologies in construction; and quality control of building materials and products.

In preparation for the conference, more than fifty organizations and scientific, educational and industrial institutions took part.

The conference attendees were able to view the posters presented during the plenary sessions, which were placed in the conference room on special stands.

In addition to the scientific and theoretical part of the conference, participants were offered excursions to the mineral water plant with automatic lines producing more than thirty items of carbonated beverages and mineral waters, as well as a visit to the resort "Lake Karachi" with a visit to all the facilities of this medical and health institution. Participants of the conference were given a tour of Lake Chany with observation of nests of pelicans, evening concert programs, swimming with salt lake water, riding on hydrocycles, etc.

*The majority of participants of the conference expressed their gratitude to the organizers for the clear and skillful conduct of the scientific and practical event and, foremost, to the host-organizer, the general director of Ltd. "Karachinskiy Istochnik" Prof. Vladimir Fedorovich Khritankov.*

During the discussions, it was decided to hold such scientific forums regularly, and the reports made at the conference were recommended for publication in scientific and technical journals such as "Housing Construction" and "Building Materials", "Expert: Theory and Practice, and "Izvestia Universities. Construction".

*Отчет поступил в редакцию 23.08.2023; принят к публикации 27.10.2023.*

*The report was submitted 23.08.2023; accepted for publication 27.10.2023.*

Научная статья

УДК 624 : 69

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

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

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_29

## ASSESSMENT OF CIRCULAR PRESTRESSING IMPACT ON CONDEEP PLATFORM STORAGE RESERVOIRS VIA MECHANICAL PRINCIPLES

© The Author(s) 2023

**BASHIRZADE Seymour**

Department of Civil Engineering, Akdeniz University  
(Turkey, Antalya)

**OZCAN Okan**

Department of Civil Engineering, Akdeniz University  
(Turkey, Antalya)

**GARIBOV Rafail B.**

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

**Abstract.** The application of prestressed concrete to cylindrical structures is now recognized as one of the most cost-effective designs. Circular prestressing addresses the weaknesses of leakage and cracking that are common in traditional reinforced concrete tanks. It requires less maintenance, has superior fire resistance, and is a suitable substitute if the steel is costly. This study investigated the entire application of circular prestressed concrete Condeep platform supports and provided recommendations for a circular prestressing methodology.

**Keywords:** condeep platforms; circular prestressed; post-tensioned concrete; hollow concrete sections

**For citation:** Assessment of circular prestressing impact on condeep platform storage reservoirs via mechanical principles / S. Bashirzade, O. Ozcan, R.B. Garibov // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 29-35. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_29



## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ КРУГЛОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА РЕЗЕРВУАРЫ ХРАНЕНИЯ КОНДИП ПЛАТФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ

© Авторы, 2023  
ORCID 0000-0002-0870-6345

**БАШИРЗАДЕ Сеймур**  
Кафедра гражданского строительства, Акденизский университет  
(Турция, Анталья)

ORCID 0000-0001-9905-1657

**ОЗДЖАН Окан**  
Кафедра гражданского строительства, Акденизский университет  
(Турция, Анталья)

SPIN-код: 8718-9610  
ORCID 0000-0001-9500-2874

**ГАРИБОВ Рафаил Баширович**  
доктор технических наук, профессор, советник РААСН  
АНО "ИССТЭ" (Тольятти, Россия, e-mail: srbashirzade@gmail.com)

**Аннотация.** Применение предварительно напряженного бетона в цилиндрических конструкциях в настоящее время признано одним из наиболее экономичных решений. Круговое предварительное напряжение устраняет недостатки, связанные с уткой и растрескиванием, которые распространены в традиционных железобетонных резервуарах. Он требует меньше обслуживания, обладает повышенной огнестойкостью и является подходящей заменой, если сталь дорогая. В данном исследовании было рассмотрено применение круглого предварительно напряженного бетона для опор. Платформа Condeep поддерживает методологию кольцевого предварительного напряжения и предоставляет рекомендации.

**Ключевые слова:** платформы Кондип; круглое предварительное напряжение; напряженный после натяжения бетон; полые бетонные секции

### *Introduction*

Condeep platforms are large concrete structures that are used for offshore drilling and storage. The main support structure is a large concrete cylinder sunk into the seabed using a technique known as gravity-based structure (GBS) (Fig. 1). GBS involves the construction of a concrete cylinder on land, which is then towed to the site and sunk into place. The storage tanks on a Condeep platform were designed to withstand the weight of the stored liquid sand environmental conditions. The location of the storage tanks at the top of the platform has several benefits, such as easy access for maintenance and inspection, a reduction in the risk of contamination from seawater or other external sources, and the prevention of damage to the tanks from marine life or other environmental factors.

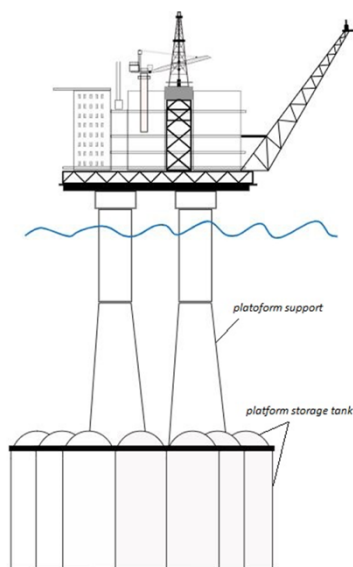
Cylinders are essential components used in a wide range of engineering applications to confine or resist liquids entering or exiting them. A Condeep platform storage tank is used to store various fluids, including water, liquid petroleum, petroleum products, and similar products. These storage tanks are built to endure high hydrostatic pressure, which is expected to be distributed equally within each layer but fluctuate vertically along the direction of the shell.

Researchers have investigated various aspects of their design and behavior to ensure the safe and reliable performance of these structures. Daftardar et al. (2017) presented an analytical solution for the calculation of the hoop tension in liquid storage cylindrical tanks. The authors used the classical bending theory to derive the formula and applied it to tanks with bottom-fixed and

top-free boundary conditions [1]. It is noteworthy that Timoshenko (1959) applied the solution of the radial deformation of a tank wall to a similar or superior equation for the deflection of a beam on an elastic foundation. In certain approaches, subgrade reaction coefficients are included in the equations [2]. Lui's dissertation (1960) comprehensively analyzed the design of circular prestressed concrete tanks and proposed a seldom used circular prestressed concrete tank approach in the United States. The study includes a dynamic analytical investigation, a detailed explanation of the proposed prestressing approach, and an illustration of the complete design procedure. Additionally, this study conducted a comparative evaluation of several commonly used circular prestressing methods to arrive at a final decision [3]. Pasternak (1932) also made a valuable contribution by presenting practical calculations for the design of folds and cylindrical shells that consider the bending moments [4]. Wills (1953) investigated the design and construction of prestressed concrete reservoirs and presented a case study of a 10,000-gallon tank [5].

Finally, Nwakonobi (2015) conducted a static analysis and design of laterised concrete cylindrical shells for farm storage, which provided insights into the behavior of such structures under different loads and soil conditions. The aforementioned studies collectively demonstrate the importance of understanding the behavior and design of cylindrical tanks and shells, as well as the significance of analyzing their responses to various loads and boundary conditions [6].



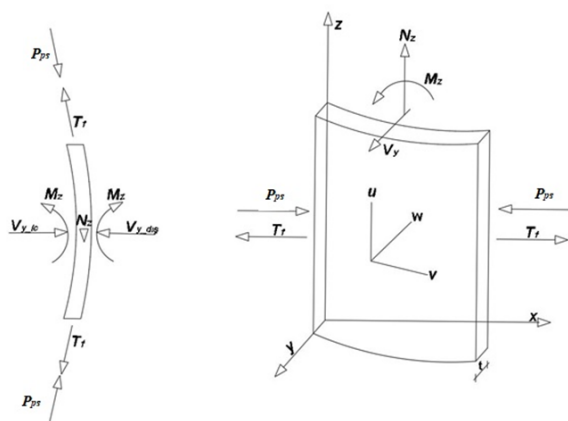


**Fig. 1.** Condeep types offshore platform  
(Credit: energyfaculty)

This study investigated the influence of circular prestressing on the design of deep platform columns and storage tanks subjected to both internal and external hydrostatic pressures. Prestressing is a technique for increasing the strength and longevity of concrete constructions by compressing the material before subjecting it to external stress. We aimed to determine the appropriate prestressing force for Condeep platform columns and storage tanks under hydrostatic pressure, which is essential for a safe and effective operation.

#### Analytical modelling

It was considered that the thickness of the tank wall was relatively modest in relation to its height, and the thin cylindrical shell analysis concept was applied. The tank had a closed ring implementation. Moments and shear forces were observed mainly in the zy-plane and horizontal edges. The material was considered to be elastic and isotropic, and the tangential force was constant (Fig. 2).



**Fig. 2.** Internal forces and displacements scheme in Condeep platform support sections and storage reservoir

#### a) Force equilibrium

Force equilibrium refers to the state, in which all the forces acting on a body or system are balanced and there is no net force acting on it. For a system to be in force equilibrium, the sum of all the forces acting on it must be zero.

1. The concept of equilibrium in mechanics states that if an item does not accelerate in the vertical direction (along the z-axis), the total of all forces acting on it must equal zero.

$$\sum F_z = 0;$$

$$N_z = - \int P_z dz + C_1 \quad (1)$$

2. Similarly, the concept of equilibrium in mechanics states that if an item does not accelerate radially, the total of all forces acting on it in the radial direction (perpendicular to the axis of rotation) must equal zero.

$$\sum F_r = 0;$$

$$\frac{d}{dz} (V_{y_{in}} - V_{y_{ex}}) + \frac{T_\phi}{R} - \frac{P_{ps}}{R} + P_i - P_d = 0 \quad (2)$$

#### b) Compatibility equilibrium

Compatibility equilibrium refers to the condition under which the deformation of a structure is compatible with the applied load. In other words, the deformation caused by an applied load should be consistent with the deformation capacity of the material. This requires that the structure not undergo any significant deformation, which can cause failure or instability.

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu \sigma_\phi)$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{1}{E} (\sigma_\phi - \nu \sigma_z) = - \frac{2\pi(R+w) - 2\pi R}{2\pi R} = - \frac{w}{R}$$

Vertical unit stress, also known as axial stress, is the vertical stress, whereas tangential unit stress, also known as circumferential stress, is the tangential or circumferential stress.

$$\sigma_z = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_z + \nu \varepsilon_\phi) \sigma_\phi = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_\phi + \nu \varepsilon_z)$$

$$A = 1 \times t = t$$

The vertical load or force acting on a cylindrical structure, as determined by the axial stress,  $\sigma_z$ , and the cross-sectional area,  $A$

$$N_z = \sigma_z \times A = \frac{Et}{1 - \nu^2} (\varepsilon_\phi + \nu \varepsilon_z)$$

$$N_z = \frac{Et}{1 - \nu^2} \left( \frac{du}{dz} - \nu \frac{w}{R} \right) \quad (3)$$

$$N_z = - \int P_z dz + C_1 = 0$$

$$\frac{du}{dz} - \nu \frac{w}{R} = 0 \quad (4)$$

Accordingly, for tangential or tension force:

$$T_\phi = \frac{Et}{1 - \nu^2} (\varepsilon_\phi + \nu \varepsilon_z)$$

$$T_\phi = \frac{Et}{1-\nu^2} \left( -\frac{w}{R} + \nu \frac{du}{dz} \right) \quad (5)$$

$$T_\phi = \frac{Et}{1-\nu^2} \left( -\frac{w}{R} + \nu^2 \frac{w}{R} \right) = -\frac{Et\nu w}{R} \quad (6)$$

c) *Moment-curvature equilibrium*

This equilibrium refers to the balance between the moments and curvatures of an element: the moment-curvature relationship is typically derived from the stress-strain relationship of the material, and can be used to determine the strength and stiffness of the element. While studying a surface's curvature, it is critical to understand the many directions in which the curvature might occur. One example is parallel to the y-plane. The curvature is represented by the variable  $K_z$ , which is defined as the reciprocal of the radius of curvature in the zy plane, indicated by  $R_z$ .

$$K_z = \frac{1}{R_z}$$

It is also critical to evaluate the behavior of a complex surface while evaluating its curvature. The xy plane is one such plane, and its curvature is defined by variable  $K_x$ . It is defined as the reciprocal of  $R_x$  and the radius of curvature in the xy plane. However, in the case of a flat surface in the xy plane, the radius of curvature becomes infinite, resulting in  $K_x$  equal to zero.

$$K_x = \frac{1}{R_x} = \frac{1}{\infty} = 0$$

By understanding how the curvature affects the strain in different directions, it can better predict how a material will deform or behave under various conditions and describe the relationship between the curvature-induced strain in a material and the radius of curvature in the zy and xy planes.

$$e_z = t \times K_z = \frac{t}{R_z} e_x = t \times K_x = \frac{t}{R_x} = 0$$

The relationships among stress, strain, and curvature can help determine the behavior of materials subjected to curvature-causing external pressures.

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_z + \nu \varepsilon_x) = \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{t}{R_z} + \frac{t}{R_x} \nu \right)$$

$$= \frac{E}{1-\nu^2} \times \frac{t}{R_z}$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_z) = \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{t}{R_x} + \frac{t}{R_y} \nu \right)$$

$$K_z = -\frac{d\theta}{dz} \theta = -\frac{dw}{dz} K_z = -\frac{d^2w}{dz^2}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2} \left( -\frac{d^2w}{dz^2} \right)$$

$$M_z = \sigma_z \frac{I}{C} = \frac{1}{12} E t^3$$

$$M_z = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left( -\frac{d^2w}{dz^2} \right) = E_D \left( -\frac{d^2w}{dz^2} \right)$$

$$E_D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

When we consider that it possesses flexural stiffness,

$$V_y = -E_D \left( \frac{d^3w}{dz^3} \right) \quad (7)$$

We obtain the resulting equation by solving the (2) equilibrium equation.

$$-\frac{d^4w}{dz^4} - \frac{Et\nu}{E_D R^2} - \frac{P_{ps}}{E_D R} + \frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} = 0 \quad (8)$$

When we consider in the flexural stiffness and simplify the equation, we obtain

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1-\nu^2)}{(2R)^2 t^2}} E_D = \frac{Et}{(2R)^2 \beta^4};$$

Final state of equations;

$$\frac{d^4w}{dz^4} + 4\beta^4 w = \frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \quad (9)$$

*Coefficient verification and modification*

Because equation (9) is a heterogeneous differential equation, its solution can be viewed as a combination of general ( $w_{gen}$ ) and specific ( $w_{sp}$ ) solutions.

$$w = w_{gen} + w_{sp} \quad (10)$$

$$\frac{d^4w}{dz^4} + 4\beta^4 w = 0$$

$$w_{gen} = e^{\beta z} (C_1 \cos \beta z + C_2 \sin \beta z)$$

$$+ e^{-\beta z} (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z) = 0$$

We may recalibrate the coefficients,  $C_1$  and  $C_2$  because  $H$  is several times bigger than  $t$ .

$$w = w_{gen} + w_{sp} = e^{-\beta z} (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z)$$

$$- \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{P_i}{E_D} - \frac{P_d}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right)$$

$$\text{Internal pressure: } P_i = C' \gamma_i (H - z) R \quad (11)$$

$$\text{External pressure: } P_d = C' \gamma_d H R \quad (12)$$

$$w = e^{-\beta z} (C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z)$$

$$- \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C' \gamma_i (H - z) R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right)$$

The coefficients  $C_3$  and  $C_4$  are determined from the bottom fixed supported condition.

$$w_{z=0} = 0 = C_3 - \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C' \gamma_i (H - z) R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) = 0$$

$$C_3 = \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C' \gamma_i H R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right)$$

$$\frac{dw}{dz} (z = 0) = \left[ \beta C_3 e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z) \right.$$

$$+ \beta C_4 e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z)$$

$$- \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C' \gamma_i (H - z) R}{E_D} - \frac{C' \gamma_d H R}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \Bigg]_{z=0} = 0$$

$$\frac{dw}{dz} (z = 0) = \beta (C_4 - C_3) - \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C' \gamma_i H R}{E_D} \right) = 0$$



$$\begin{aligned} \frac{dw}{dz}(z=0) &= \beta \left( C_4 - \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C'\gamma_i HR}{E_D} - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) - \frac{1}{4\beta^4} \frac{C'\gamma_i HR}{E_D} \right) = 0 \\ C_4 &= \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C'\gamma_i HR}{E_D} \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \\ w &= e^{-\beta z} \left( \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C'\gamma_i HR}{E_D} - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \cos \beta z + \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C'\gamma_i HR}{E_D} \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \sin \beta z - \frac{1}{4\beta^4} \left( \frac{C'\gamma_i (H-z)R}{E_D} - \frac{C'\gamma_d HR}{E_D} - \frac{P_{ps}}{E_D R} \right) \right) \\ w &= \frac{e^{-\beta z}}{4\beta^4 E_D} \left( \left( (C'\gamma_i HR - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R}) \cos \beta z + \left( C'\gamma_i HR \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \sin \beta z - (C'\gamma_i (H-z)R - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R}) \right) \right) \quad (14) \end{aligned}$$

As a result, the ring tension and moment developed in the wall can be estimated using the following formula:

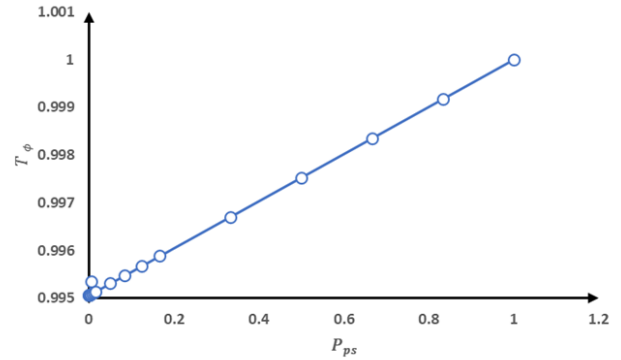
$$\begin{aligned} T_\phi = -\frac{Etw}{R} &= -\frac{Et}{R} \left\{ \frac{e^{-\beta z}}{4\beta^4 E_D} \left( \left( (C'\gamma_i HR - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R}) \cos \beta z + \left( C'\gamma_i HR \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \sin \beta z - (C'\gamma_i (H-z)R - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R}) \right) \right) \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

Eq. (15) gives an equation for the circular prestressing force and is dependent on various parameters such as the Young's modulus of the wall material, the thickness of the wall, the radius of curvature, the depth of the wall, and other parameters such as the coefficients of pressure and the prestressing

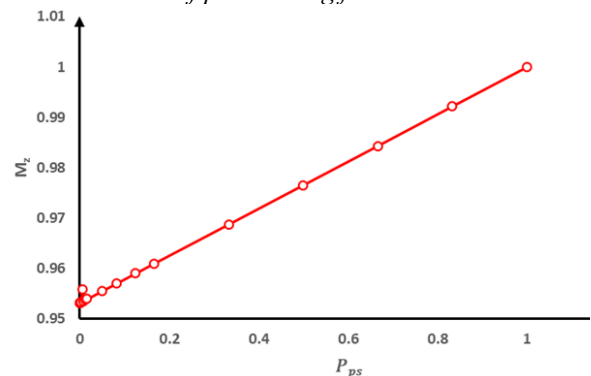
force. This equation involves several terms with trigonometric and exponential functions, and can be used to estimate the circular prestressing force at different wall depths.

$$\begin{aligned} M_z &= -E_D \left( \frac{d^2 w}{dz^2} \right) \\ &= \frac{e^{-\beta z}}{2\beta^2 E_D} \left( \left( C'HR(\gamma_i - \gamma_d) - \frac{P_{ps}}{R} \right) \sin \beta z + \left( C'\gamma_i HR \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) - C'\gamma_d HR - \frac{P_{ps}}{R} \right) \cos \beta z \right) \quad (16) \end{aligned}$$

Eq. (16) gives an equation for the moment, and is also dependent on parameters similar to Eq. (15). The formula involves second-order differentiation of the wall deflection with respect to depth and includes terms with trigonometric and exponential functions. This formula can be used to estimate the moment at various wall depths. As a case study, basic mechanical formulas (15) and (16) allow us to accurately evaluate the changes in tension (Fig. 3) and moments (Fig. 4) obtained by circular prestressing in a shell at a depth of 100 m. These data may be applied to best prepare the design of the Condeep structure and ensure that it can handle projected loads and environmental conditions.

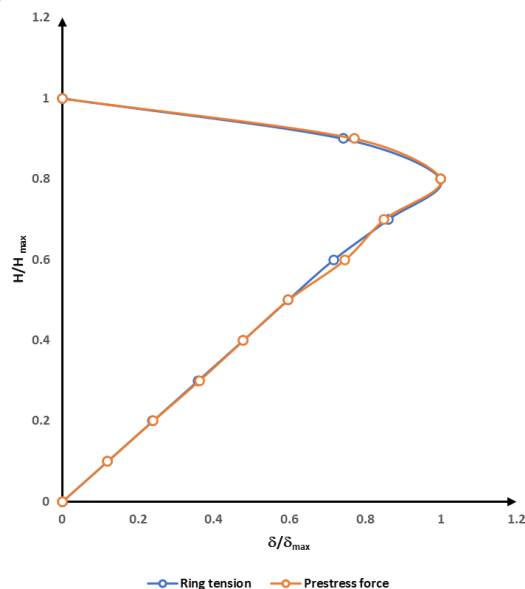


**Fig. 3.** Tension force changing from the effect of prestressing force



**Fig. 4.** Moment changing from the effect of prestressing force

The proper distribution of ring tension and prestressed force is essential for system analysis and performance. (Fig. 5) It affects the level of stress and strain experienced by the system and the failure mode of the system. If the forces are evenly distributed, the system may fail in a controlled manner, allowing appropriate mitigation measures to be taken. Therefore, it is important to prioritize an even distribution of these forces and ensure that they are properly balanced.



**Fig. 5.** The distribution of ring tension and prestress force along the length of structure for the displaced structure

## Discussion and conclusion

For the constant-thickness case, the provided equations can be implemented with a low error rate. In a cylindrical tank, circular prestressing is used to generate pressure that opposes and balances the hydrostatic water pressure. Because the specified segment was submerged in water, the impact of the external liquid was sufficient to counterbalance the hydrostatic pressure within the structure of Condeep's multiple marine platforms. However, circular prestressing does not provide a significant advantage for Condeep-type platforms, as shown in Fig. (3) and (4), respectively. Instead, it adds stress to the reinforced concrete section by either "supporting" the external pressure or increasing the magnitude of the stresses. The impact of the circular prestressing force balances the moment produced by the external load when the prestressed concrete tank is full. This is the primary benefit of prestressing during concrete tank construction. When the tank was empty, only the bending effect of the circular prestressing wire occurred. In most cases, an empty tank represents the critical design condition. Hence, it is essential to investigate the tensile stresses induced by the prestressing forces. For instance, it may be advantageous to add conventional mild steel-reinforced bars to handle tensile loads, thereby resulting in partial prestressing.

## Nomenclature:

- $P_z$  – Vertical pressure
- $T_\phi$  – Tangential force or ring tension
- $P_i$  – Internal forces
- $P_d$  – External force
- $R$  – Radius of Condeep supports
- $P_{ps}$  – Prestressed force
- $E_D$  – flexural stiffness
- $C'$  – Impact factor
- $\gamma_i$  – Density of liquid inside
- $\gamma_d$  – Density of liquid outside
- $H$  – height of structure
- $V$  – Shear force
- $M$  – Bending moment
- $w$  – Radial displacement of structure

## References

1. Anand Daftardar, Shirish Vichare, Jigisha Vashi. (2017): An Analytical Solution for Hoop Tension in Liquid Storage Cylindrical Tanks, International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), pp. 99-104.
2. Timoshenko S.P., and Woinowsky-Krieger S. (1959), Theory of Plates and Shells, 2nd Edition, McGRAW-HILL, New York.
3. Liu, Chi-Yek. "A study of the complete design for circular prestressed concrete tank and its dynamic analysis." PhD diss., Virginia Tech, 1960.
4. Pasternak P. L. (1932), Practical Calculations for Folds and Cylindrical Shells Taking Bending Moments into Account, Stroitelny byulleten,
5. Wills, R. F. (1953). Prestressed concrete reservoirs. New Zealand Engineering, 8(2), 54-59.
6. Nwakonobi, T. U. (2015). Static Analysis and Design of Laterized Concrete Cylindrical Shells for Farm Storages (Doctoral dissertation).
7. Creasy, L. R. (1958). Prestressed Concrete Cylindrical Tanks. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 9(1), 87-114
8. Ereemeev, V. V., & Zubov, L. M. (2017). Buckling of a two-layered circular plate with a prestressed layer. Mathematics and mechanics of solids, 22(4), 773-781.
9. Liu, C. F., & Chen, T. J. (2013). A simple and unified displacement field for three-dimensional vibration analysis of prestressed circular plates. Journal of Vibration and Control, 19(1), 120-129.
10. de Lana, J. A., Júnior, P. A. A. M., Magalhães, C. A., Magalhães, A. L. M. A., de Andrade Junior, A. C., & de Barros Ribeiro, M. S. (2021). Behavior study of prestressed concrete wind-turbine tower in circular cross-section. Engineering Structures, 227, 111403.
11. Pavel, F. (2021). Seismic risk assessment of on-ground circular reinforced concrete and prestressed concrete water tanks using stochastic ground motion simulations. Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 161-178.
12. Zhang, H., Guo, Q. Q., & Xu, L. Y. (2023). Prediction of long-term prestress loss for prestressed concrete cylinder structures using machine learning. Engineering Structures, 279, 115577.



Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 01.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья

УДК 691

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_36

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ В КАЧЕСТВЕ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ СРОКОВ СХВАТЫВАНИЯ ГИПСОВОГО, ВЯЖУЩЕГО<sup>1</sup>

© Авторы 2023

SPIN: 3636-7830

**БЕРНАЦКИЙ Анатолий Филиппович**

доктор технических наук, профессор

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств им. А.Д. Крячкова

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

**ГОЛУБЕВА Мария Борисовна**

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств им. А.Д. Крячкова

(Россия, Новосибирск)

**Аннотация.** В НГУАДИ проведены исследования по определению влияния добавки уксусной кислоты на сроки схватывания и прочностные свойства строительного гипса. Установлены зависимости сроков начала и конца схватывания от количества замедляющей добавки 9 %-ной уксусной кислоты. Приведены данные об изменении прочности при сжатии и изгибе образцов гипсового камня.

**Ключевые слова:** строительный гипс; добавки; строительные материалы; уксусная кислота; схватывание; прочность

**Для цитирования:** Использование уксусной кислоты в качестве замедлителя сроков схватывания гипсового, вяжущего / А.Ф. Бернацкий, М.Б. Голубева // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 36-40. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_36

Original article

## USE OF ACETIC ACID AS A TIMING DECELERATOR OF GYPSUM BINDER SETTING

© The Author(s) 2023

**BERNATSKY Anatoly Filippovich**

doctor of technical sciences, professor

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts

(Russia, Novosibirsk, e-mail: afbernacki@nsuada.ru)

**GOLUBEVA Maria Borisovna**

student

Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts

(Russia, Novosibirsk, e-mail: afbernacki@nsuada.ru)

**Abstract.** Studies have been conducted at Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts to determine the influence of an acetic acid additive on the contraction time and strength properties of the building plaster. The timing of the onset and end of contraction was determined by the slowing addition of 9% acetic acid. Data on compression strength and bending of plaster stone samples are given.

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



**Keywords:** building plaster; additives; building materials; acetic acid; clashing; strength

**For citation:** Use of acetic acid as a timing decelerator of gypsum binder setting / A.F. Bernatsky, M.B. Golubeva // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 36-40. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_36

Гипсовые вяжущие относятся к классу воздушных минеральных вяжущих веществ и отличаются быстрыми сроками схватывания, и начало схватывания может наступить уже через несколько минут. Однако, например, в случае использования сухих штукатурных смесей на гипсовых вяжущих при механизированном оштукатуривании методом пульверизации, их схватывание должно наступать не ранее 30 минут.

Для того, чтобы продлить сроки схватывания гипсовых вяжущих, существуют различные виды замедляющих добавок [1-3]. В таблице 1 приведен перечень ряда замедляющих добавок.

В Новосибирском государственном университете архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова (НГУАДИ) на лабораторных занятиях по дисциплине «Архитектурное материаловедение» студентами второго курса проведены исследования по определению влияния добавки уксусной кислоты на сроки схватывания и прочностные свойства строительного гипса.

В качестве объекта исследований использовался строительный гипс марки Г-5 (изготовитель «ООО Планета ГИПС», республика Адыгея), Подвижность гипсового теста, сроки схватывания, прочность при сжатии и при изгибе затвердевшего гипса в процессе исследований определялись по методикам ГОСТ 23789 [4]. Для прочностных испытаний изготавливались образцы-призмы размером 16x4x4 см с различным водогипсовым отношением (В/Г), равным 0,52; 0,54; 0,56 и 0,58. В качестве замедлителя сроков схватывания использовался 9 %-ный раствор уксусной кислоты.

Таблица 1. Замедлители сроков схватывания гипсовых вяжущих [1]

| Наименование добавки                       | Нормативный документ | Кол-во добавки | Области применения         |
|--------------------------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|
| Животный клей (мездровый)                  |                      | 0,4...0,6      | Замедление на 15...20 мин. |
| Бура техническая                           | ГОСТ 8429-77         | 0,2...0,6      | То же                      |
| Щелочной сток производства капролактама    | ТУ 113-03-488-84     | 0,005...0,1    | Сильный замедлитель        |
| Цитраты натрия, кальция                    |                      |                | Сильный замедлитель        |
| Винная или виннокаменная кислоты и их соли |                      |                | Сильный замедлитель        |

Таблица 2. Свойства исходного гипса

| Навеска гипса, г | В/Г  | Вода, мл | Расплав, мм | Сроки схватывания, мин-сек |         | Прочность, МПа |            |
|------------------|------|----------|-------------|----------------------------|---------|----------------|------------|
|                  |      |          |             | начало                     | конец   | при сжатии     | при изгибе |
| 250              | 0,52 | 130      | 122         | 5'05''                     | 7'34''  | 7,6            | 4,2        |
|                  | 0,54 | 135      | 150         | 5'15''                     | 8'45''  | 6,7            | 3,9        |
|                  | 0,56 | 140      | 180         | 5'30''                     | 9'00''  | 6,4            | 3,8        |
|                  | 0,58 | 145      | 220         | 6'00''                     | 10'30'' | 5,6            | 3,7        |

Свойства исходного гипса без введения замедляющих добавок приведены в таблице 2.

Таким образом, согласно ГОСТ 125-2018 исследуемый гипс относится к быстротвердеющим марки Г-6 А III.

С увеличением В/Г возрастает подвижность гипсового теста, которая характеризуется диаметром расплыва ( $D_{\text{распл}}$ ) лепешки гипсового теста (рисунок 1). Гипсовое тесто достигает стандартной консистенции (нормальной густоты) при В/Г = 0,56, при котором  $D_{\text{распл}}$  равен 180 мм.

Теоретически для гидратации полугидрата сульфата кальция требуется 18,62 % от массы вяжущего [1]. Вода, остающаяся в гипсовом камне после гидратации, испаряется, образуя в нем поры и капилляры. И чем больше водогипсовое отношение, тем выше пористость, а соответственно, ниже прочность гипсового камня. Это наглядно подтверждается данными, приведенными на рисунке 1.

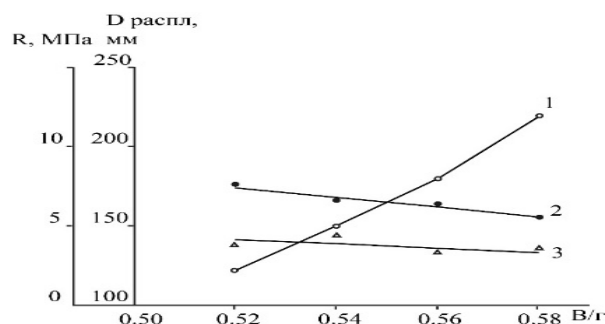


Рисунок 1. Зависимость диаметра расплыва (1) гипсового теста, прочности при сжатии (2) и изгибе (3) гипсового камня от водогипсового отношения.

Изменение сроков схватывания исходного гипсового теста в зависимости от водогипсового отношения приведено на рисунке 2.

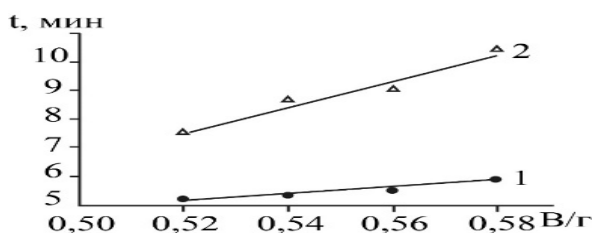


Рисунок 2. Зависимость времени начала схватывания (1) и конца схватывания (2) от водогипсового отношения.

Из данных, приведенных на рисунке 2, видно, что начало схватывания и конец схватывания изменяются от водогипсового отношения по прямолинейной зависимости. Причем, сроки схватывания гипсового теста увеличились не столь значительно. Так, время начала схватывания гипсового теста с  $V/G = 0,58$  увеличилось на одну минуту, а конца схватывания - на три минуты.

Определение сроков начала и конца схватывания гипсового теста производилось при введении замедляющей добавки уксусной кислоты в количестве от 2,3 до 8,3 % от массы навески гипса 250 г. Водогипсовое отношение оставалось одинаковым  $V/G = 0,52$ .

В таблице 3 приведены данные о сроках начала и конца схватывания гипсового теста с  $V/G = 0,52$  с введенными замедляющими добавками уксусной кислоты.

Таблица 3. Сроки схватывания гипсового теста ( $V/G = 0,52$ ) при различных количествах замедляющей добавки уксусной кислоты

| Навеска гипса, г | Уксус, % | Сроки схватывания, мин-сек |         |
|------------------|----------|----------------------------|---------|
|                  |          | начало                     | конец   |
| 250              | 2,3      | 9'00''                     | 11'30'' |
|                  | 2,4      | 8'00''                     | 9'30''  |
|                  | 3,2      | 9'00''                     | 12'00'' |
|                  | 4,0      | 11'30''                    | 18'00'' |
|                  | 4,6      | 12'30''                    | 17'30'' |
|                  | 4,8      | 27'00''                    | 32'00'' |
|                  | 6,2      | 27'00''                    | 31'00'' |
|                  | 8,3      | 28'30''                    | 33'40'' |

На рисунке 3 приведены данные зависимости сроков начала и конца схватывания гипсового теста от количества замедляющей добавки уксусной кислоты. Из приведенных данных прослеживается также прямолинейная зависимость сроков схватывания, как начала, так и конца схватывания, от количества добавки уксусной кислоты.

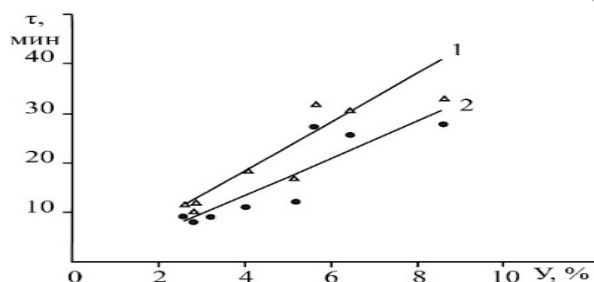


Рисунок 3. Изменение сроков конца (1) и начала схватывания (2) гипсового теста ( $V/G = 0,52$ ) от добавки уксусной кислоты.

Введение добавки уксусной кислоты, замедляющей сроки схватывания гипсового теста, отрицательно сказывается на прочностных показателях гипсового камня. На рис. 4 приведена зависимость прочности при сжатии и изгибе гипсовых образцов, изготовленных с одинаковым  $V/G = 0,52$ , от количества вводимой добавки уксусной кислоты.

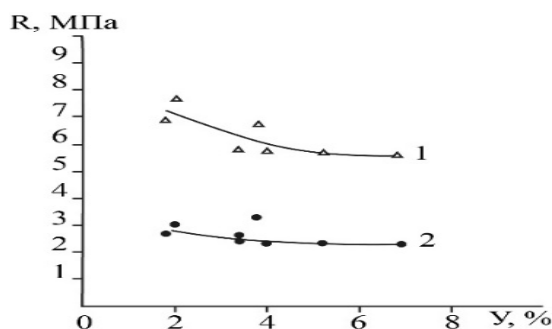


Рисунок 4. Зависимость прочности при сжатии (1) и изгибе (2) гипсовых образцов от количества вводимой уксусной кислоты.

Снижение прочностных свойств гипсового камня с увеличением количества вводимой добавки уксусной кислоты можно объяснить более поздними сроками начала процессов структурообразования, которые и определяют прочностные характеристики затвердевшего гипса. Поскольку прочностные испытания образцов производились в одно и то же время после приготовления гипсового теста, из-за увеличения сроков схватывания гипса при введении замедляющей добавки уксусной кислоты структурообразование гипсового камня не успевало завершиться к моменту испытания гипсовых образцов.

Аналогичные исследования по определению влияния количества замедляющей добавки уксусной кислоты на сроки схватывания гипсового теста и прочностные свойства гипсового камня были проведены на составах с различным водогипсовым отношением ( $V/G = 0,52; 0,54; 0,56$  и  $0,58$ ).

В таблице 4 приведены данные о сроках начала и конца схватывания гипсового теста с различным водогипсовым отношением при введении замедляющей добавки 9 %-ной уксусной кислоты в количестве от 2 до 9 % от массы навески гипса.



Таблица 4. Сроки схватывания гипсового теста при различных количествах замедляющей добавки уксусной кислоты

| Навеска гипса, г | В/Г  | Вода, мл | Уксус, % | Сроки схватывания, мин-сек |        |
|------------------|------|----------|----------|----------------------------|--------|
|                  |      |          |          | начало                     | конец  |
| 250              | 0,52 | 130      | 2,1      | 15'15"                     | 21'00" |
|                  |      |          | 2,3      | 10'00"                     | 14'00" |
|                  | 0,54 | 135      | 4,2      | 14'20"                     | 19'20" |
|                  |      |          | 4,6      | 19'30"                     | 28'00" |
|                  | 0,56 | 140      | 6,2      | 20'00"                     | 30'30" |
|                  |      |          | 7,0      | 19'30"                     | 28'00" |
|                  | 0,58 | 145      | 8,3      | 30'00"                     | 49'00" |
|                  |      |          | 9,3      | 23'30"                     | 34'00" |

На рисунке 5 представлены результаты испытаний по определению сроков схватывания гипсового теста от количества вводимой замедляющей добавки уксусной кислоты.

Сравнивая данные по срокам схватывания гипсового теста, представленные на рисунках 3 и 5, можно отметить, что добавки уксусной кислоты оказывают тем меньшее влияние на увеличение сроков схватывания, чем больше В/Г-отношение.

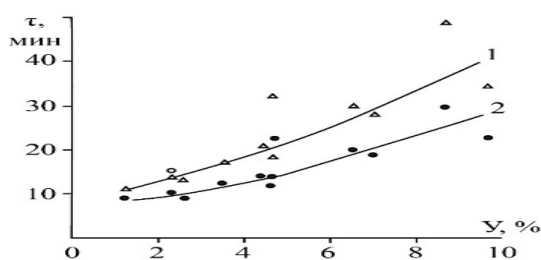


Рисунок 5. Изменение сроков конца (1) и начала схватывания (2) гипсового теста с различным В/Г-отношением от добавки уксусной кислоты.

На рисунке 6 представлены зависимости прочности при сжатии и изгибе образцов затвердевшего гипса от количества замедляющей добавки уксусной кислоты (при различных В/Г-отношениях).

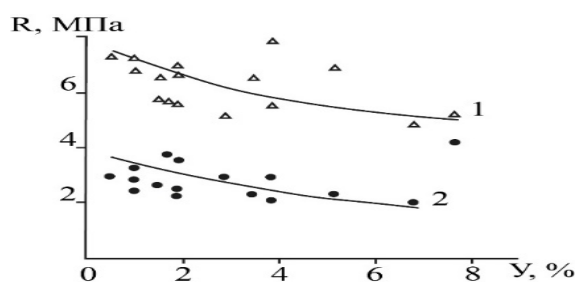


Рисунок 6. Зависимость прочности при сжатии (1) и изгибе (2) гипсовых образцов от количества вводимой уксусной кислоты.

Также как и в предыдущем случае, прочность гипсового камня изменяется примерно по одинаковой зависимости при одновременном увеличении количества замедляющей добавки и исходного В/Г-отношения. Можно констатировать, что увеличение В/Г-отношения почти не оказывает влияния на сроки схватывания гипсового теста, а основное замедляющее воздействие оказывает уксусная кислота.

При добавлении большого количества уксусной кислоты из гипсового теста вдруг начиналось выделение мельчайших пузырьков углекислого газа (рис. 7).



Рис.7. Фото образцов гипсового камня.

На фото изображены образцы затвердевшего гипса: слева – образцы из исходного гипса, справа – образцы с добавкой 9-процентной уксусной кислоты. Объяснить этот факт можно только одним предположением: производители данной партии при помолу гипса добавляли известняк белого цвета. Поэтому после приготовления гипсового теста уксусная кислота вступала в химическую реакцию с минералом кальцитом, которая сопровождалась образованием углекислого газа.

#### Закключение

Разбавленная уксусная кислота 9 %-ной концентрации может служить добавкой к строительному гипсу, которая удлиняет сроки схватывания гипсового теста. При добавлении 8-10 % уксусной кислоты указанной концентрации от массы гипса схватывание гипсового теста начинается через 30-40 минут после его приготовления.

#### Библиографический список

1. Гипс в малоэтажном строительстве / А. В. Ферронская [и др.] ; под общ. ред. А. В. Ферронской. – Москва : Изд-во Ассоц. строительных вузов, 2008. – (Наука - производству). – ISBN 978-5-93093-615-5. – EDN QNNSHH.
2. Башкатов, Н. Н. Минеральные воздушные вяжущие вещества : учебное пособие для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 "Строительство" / Н. Н. Башкатов. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – 148 с. – ISBN 978-5-7996-2271-8. – EDN XMFPIT.



3. Литвиненко, С. В. Применение замедлителя схватывания для гипсовых вяжущих Retardan 225P / С. В. Литвиненко // Строительные материалы. – 2012. – № 7. – С. 26-27. – EDN NSELRE.

4. ГОСТ 23789-2018 Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. - М.: Стандартиформ, 2018. - 11 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 23.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья  
УДК 691.3  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
БАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_41

## ПОДБОР СОСТАВОВ ЗОЛОШЛАКОЦЕМЕНТНОЙ СМЕСИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГРУНТОБЕТОНОВ<sup>1</sup>

© Авторы, 2023  
SPIN: 5587-5247

SPIN: 4333-0354,  
ORCID: 0000-0001-8670-9229  
ScopusID: 57430911000

SPIN: 1892-5667

**БОБЫЛЬСКАЯ Виктория Александровна**  
кандидат технических наук, доцент, кафедра строительного  
производства и конструкций  
*Сибирский государственный университет водного  
транспорта (Россия, Новосибирск)*

**МАЗГАЛЕВА Ада Владимировна**  
кандидат технических наук, кандидат технических наук,  
доцент, кафедра строительного производства и конструкций  
*Сибирский государственный университет водного  
транспорта (Россия, Новосибирск, e-mail:  
a.v.mazgaleva@nsawt.ru)*

**ЛЕЩЕНКО Сергей Иванович**  
кандидат технических наук, доцент, кафедра Водных  
изысканий, путей и гидротехнических сооружений  
*Сибирский государственный университет водного  
транспорта (Россия, Новосибирск)*

**Аннотация.** Показана важность использования крупнотоннажных золошлаковых отходов и создания на их основе новых грунтобетонных материалов. Выделены основные компоненты при подборе составов золошлаковых смесей. Рассмотрены этапы подбора составов золошлакоцементных смесей при проектировании грунтобетонных для строительства сельских дорог II класса: отбор проб, расчет содержания компонентов, определяются физико-механические свойства образцов при наборе прочности в нормальных условиях через 28 и 90 суток, проверка полученных при испытании данных на соответствие требованиям СП 34.13330.2012. Показана рекомендуемая оптимальная влажность укрепляемых грунтов – песков мелких пылеватых и мелких, супесей, суглинков и глин. Определены исходные составы для проведения испытаний, произведен выбор оптимального состава. Определен гранулометрический состав золошлаковых отходов. Определено содержание микроармирующих добавок. Изучено влияние расхода золошлакоцементных смесей и отходов хризотилцемента на прочностные характеристики укрепляемого грунта. Определены оптимальные расходы комплексной добавки. Определено содержанием компонентов в композиции грунтобетонного состава, состоящего из суглинистого грунта, портландцемента, золошлаковых смесей ЗШС, отходов хризотилцемента ОХЦ и талового пека. Результаты, полученные в процессе проведения опытов в лаборатории, были опробованы при натурных внедрениях.

**Ключевые слова:** золошлакоцементные смеси; грунтобетоны; структурообразующая добавка; микроармирующая добавка; отходы хризотилцемента; золошлаковые смеси; строительные материалы

**Для цитирования:** Подбор составов золошлакоцементной смеси при проектировании грунтобетонных / В.А. Бобыльская, А.В. Мазгалева, С.И. Лещенко // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 41-46. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_41

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



## SELECTION OF ASH AND SLAG CEMENT MIXTURE COMPOSITIONS IN THE DESIGN OF SOIL CONCRETE

© The Author(s) 2023

**BOBYLSKAYA Viktoriya Alexandrovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Siberian State University of Water Transport  
(Russia, Novosibirsk)

**MAZGALEVA Ada Vladimirovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Siberian State University of Water Transport  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: a.v.mazgaleva@nsawt.ru)

**LESHCHENKO Sergey Ivanovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Siberian State University of Water Transport  
(Russia, Novosibirsk)

**Abstract.** The article shows the importance of using large-tonnage ash and slag waste and creating new soil concrete materials on their basis. The main components are identified in the selection of ash and slag mixtures. The stages of selection of ash and slag cement mixtures in the design of soil concrete for the construction of rural roads of class II are considered. Sampling, calculation of the content of components, physical and mechanical properties of samples are determined, when strength is set under normal conditions after 28 and 90 days. The verification of the data is obtained during testing for compliance with the requirements of SP 34.13330.2012. The recommended optimal humidity of the reinforced soils is shown – fine dusty and fine sands, sandy loams, loams and clays. The initial compositions for testing were determined, the optimal composition was selected. The granulometric composition of ash and slag waste has been determined. The content of micro-reinforcing additives was determined. The influence of the consumption of ash and slag cement mixtures and chrysotile cement waste on the strength characteristics has been studied

**Keywords:** ash and slag cement mixtures; soil concrete; structure-forming additive; micro-reinforcing additive; chrysotile cement waste; ash and slag mixtures; building materials

**For citation:** Selection of ash and slag cement mixture compositions in the design of soil concrete / V.A. Bobylskaya, A.V. Mazgaleva, S.I. Leshchenko // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 41-46 (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_41

### Введение

Новосибирск, как и другие города Западной Сибири, имеет продолжительный отопительный период (230 суток) и в зимнее время комфортная температура в квартирах и домах жителей поддерживается за счет работы предприятий теплоэнергетики, работающих на твердых видах топлива, дающих огромное количество золошлаковых отходов [1-5]. В свете сложившейся ценовой ситуации на рынке строительных материалов, в настоящее время особенно актуальным становится применение крупнотоннажных отходов для создания грунтобетонов из местных материалов, особенно для строительства дорог в сельской местности [6-7].

Подбор состава золошлакоцементной смеси при проектировании грунтобетонов для строительства сельских дорог должен опираться на требования к физико-механическим свойствам смесей по таблице 1, предъявляемые ГОСТ 23558-94.

Таблица 1 - Значения прочностных показателей укрепленного грунта

| Свойство укрепленного грунта                                                     | Значение показателя в зависимости от классов прочности |           |          |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|----------|
|                                                                                  | I                                                      | II        | III      |
| Модуль упругости, МПа                                                            | 800...500                                              | 500...250 | 250...80 |
| Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов, МПа                         | 6...4                                                  | 4...2     | 2...1    |
| Предел прочности на растяжении при изгибе водонасыщенных образцов, МПа, не менее | 1,0                                                    | 0,6       | 0,2      |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |      |     |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|------|
| Коэффициент морозостойкости, не менее                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,75 | 0,7 | 0,65 |
| <i>Примечание:</i> Показатели свойств при укреплении грунтов портландцементом, шлакопортландцементом и другими видами портландцементов даны для образцов, твердевших 28 суток.<br>При укреплении грунтов другими видами минеральных медленноотвердевающих вяжущих (известью, активной золой уноса сухого отбора, золой уноса с добавками цемента или извести, известково-шлаковым цементом, молотыми гранулированными шлаками) даны для образцов, твердевших 90 суток. |      |     |      |

#### Методология

Компоненты, выделенные при работе с составами:

- укрепляемый грунт;
- вяжущее (цемент, ГОСТ 31108-2020);
- структурообразующая добавка (золошлаковая смесь ЗШС);
- микроармирующая добавка (отходы хризотилцемента ОХЦ).

Этапы подбора состава золошлаковой смеси.

Первый этап - требуется отобрать составляющие пробы:

- проверяются свойства компонентов и сравниваются с нормативными требованиями;
- находится optimum влажности смеси;
- определяется максимум плотности.

Этап второй - расчет содержания компонентов:

– определяются расходы всех 4-х компонентов;

- производятся пробные замесы;
- изготавливаются опытные образцы размерами 16х40х40 мм.

Этап 3 - испытание образцов:

- определяются физико-механические свойства образцов при наборе прочности в нормальных условиях через 28 и 90 суток.

Этап 4 - проверка полученных при испытании данных на соответствие предъявляемым требованиям:

- полученные в ходе испытания образцов физико-механические показатели сравниваются с требованиями СП 34.13330.2012.

Этап 5 - выбор оптимального состава.

При определении расходов вяжущего в составе смеси необходимо учитывать следующее:

- вид грунта и его физико-механические характеристики;
- конструктивный слой, для которого разрабатывается грунтобетон (таблица 2).

Таблица 2 – Рекомендуемые ориентировочные расходы вяжущих для укрепления суглинистых грунтов в зависимости от конструктивного слоя дорожной одежды

| Конструктивный слой               | Вяжущее, % |         |
|-----------------------------------|------------|---------|
|                                   | Цемент     | Известь |
| Верхний слой основания (покрытия) | 11-14      | 7-8     |
| Нижний слой основания             | 8-12       | 5-6     |

Для песков групп крупности песок мелкий и песок особо мелкий, применённых в оптимизированных смесях по расходу цементных и известковых вяжущих и добавок направленного действия, определяется оптимальная влажность укрепляемого грунта (таблица 3) и максимальная плотность.

Таблица 3 – Optimum влажности для укрепляемого грунта (рекомендуемая)

| Вид грунта                                                                      | Optimum влажности грунта |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Пески однородные с $I_p = 1,7$ :<br>- пески мелкие пылеватые,<br>- пески мелкие | 7-10                     |
| Супеси с $I_p = 1 \div 7$                                                       | 8-11                     |
| Суглинки легкие с $I_p = 7 \div 12$                                             | 11-15                    |
| Суглинки тяжелые с $I_p = 12 \div 17$                                           | 14-19                    |
| Глины с $I_p \leq 20$                                                           | 17-23                    |

Так как при подборе компонентов грунтобетонных смесей использовались отходы производства, то представлялось необходимым более детальное изучение особенностей вторичных материалов и их гранулометрического состава (таблица 4) [8-11].



## Технические науки. Строительство и архитектура

Таблица 4 - Гранулометрический состав золошлаковых отходов

| Номер сита, мм | Масса, г                     | %     | Масса, г                                                    | %      |
|----------------|------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------|--------|
|                | Гидрозола исходная           |       | Гидрозола+дистил. вода                                      |        |
| 7              | 5,1                          | 2,93  | 0,53                                                        | 1,17   |
| 5              | 8,5                          | 4,89  | 0,81                                                        | 1,79   |
| 3              | 19,25                        | 11,07 | 2,75                                                        | 6,09   |
| 2              | 20,6                         | 11,85 | 2,46                                                        | 5,45   |
| 1              | 15,88                        | 9,13  | 4,38                                                        | 9,70   |
| 0,5            | 8,53                         | 4,91  | 2,21                                                        | 4,89   |
| 0,25           | 29,07                        | 16,72 | 8,33                                                        | 18,45  |
| 0,1            | 56,55                        | 32,53 | 19,28                                                       | 42,69  |
| <0,1           | 10,38                        | 5,97  | 4,41                                                        | 9,77   |
| Всего          | 173,86                       | 100   | 45,16                                                       | 100    |
|                | Гидрозола HCl(10)+дист. вода |       | Гидрозола HCl(10)+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +дист. вода |        |
| 5              | 0,34                         | 1,05  | 0,69                                                        | 2,15   |
| 3              | 1,77                         | 5,48  | 2,44                                                        | 7,60   |
| 2              | 2,31                         | 7,15  | 2,72                                                        | 8,47   |
| 1              | 4,05                         | 12,53 | 4,63                                                        | 14,42  |
| 0,5            | 2,12                         | 6,56  | 2,36                                                        | 7,35   |
| 0,25           | 4,86                         | 15,04 | 5,75                                                        | 17,91  |
| 0,1            | 12,35                        | 38,22 | 10,90                                                       | 33,96  |
| <0,1           | 4,51                         | 13,96 | 2,61                                                        | 8,13   |
| Всего          | 32,31                        | 100   | 32,10                                                       | 100,00 |
|                | Гидрозола HCl(20)+дист. вода |       | Гидрозола HCl(20)+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +дист. вода |        |
| 7              | 0,62                         | 1,82  | 1,31                                                        | 3,80   |
| 5              | 1,04                         | 3,06  | 1,06                                                        | 3,07   |
| 3              | 2,57                         | 7,56  | 2,84                                                        | 8,23   |
| 2              | 3,03                         | 8,92  | 2,31                                                        | 6,70   |
| 1              | 4,06                         | 11,95 | 4,20                                                        | 12,18  |
| 0,5            | 2,99                         | 8,80  | 2,45                                                        | 7,10   |
| 0,25           | 5,91                         | 17,39 | 6,07                                                        | 17,60  |
| 0,1            | 10,66                        | 31,37 | 11,18                                                       | 32,42  |
| <0,1           | 3,10                         | 9,12  | 3,07                                                        | 8,90   |
| Всего          | 33,98                        | 100   | 34,49                                                       | 100    |

Рекомендуемая дозировка комплексного минерального вяжущего с добавкой промышленных отходов и отходов теплоэнергетики ограничивается 30-35%. Это касается применения золошлаковых смесей отдельно или вместе с золой уноса. Предварительный расход ЗШС был взят в рамках 20-30%.

### Результаты

Для проведения испытаний для определения физико-механических свойств были взяты следующие составы смеси, содержание ЗШС в которых было принято 5, 10, 15, 20, 30 и 50 % по объему (таблица 5).

Влажность составов смесей, принятых к испытаниям, подбиралась с учетом следующих факторов:

- влажность грунта,
- водопотребность грунта,
- влажность добавок,
- водопотребность добавок,
- требуемой удобоукладываемости (пластичности) испытываемой смеси.

Таблица 5 - Исходные составы для испытаний, масс. час.

| № составов | Укрепляемый грунт | ЗШС | ОХЦ | Вязущее (цемент, ГОСТ 31108) |
|------------|-------------------|-----|-----|------------------------------|
| Состав 1   | 100               |     |     |                              |
| Состав 2   | 100               | 10  | -   | 10                           |
| Состав 3   | 100               | 10  | 5   | 10                           |
| Состав 4   | 100               | 10  | 10  | 10                           |
| Состав 5   | 100               | 15  | 10  | 10                           |
| Состав 6   | 100               | 20  | 10  | 10                           |
| Состав 7   | 100               | 20  | 10  | 5                            |
| Состав 8   | 100               | 25  | 10  | 5                            |
| Состав 9   | 100               | 25  | 5   | 5                            |
| Состав 10  | 100               | 10  | 15  | 5                            |
| Состав 11  | 100               | -   | 15  | 5                            |
| Состав 12  | 100               | -   | 15  | 10                           |
| Состав 13  | 100               | -   | 20  | 10                           |
| Состав 14  | 100               | 10  | 15  | 15                           |

Содержание микроармирующих добавок (в нашем случае отходов хризотилцемента ОХЦ) устанавливается из экономических соображений, технологических возможностей и требований к прочности дорожного основания (для II класса дорог требуется прочность на изгиб не менее 0,6 МПа).

Результаты, полученные в процессе проведения опытов в лаборатории, были опробированы при натурных внедрениях [10-13] и позволяют определиться с содержанием компонентов (таблица 6).

Таблица 6 – Содержание компонентов в композиции

| Компонент         | Содержание, (масс. %) |
|-------------------|-----------------------|
| Суглинистый грунт | 100                   |
| портландцемент    | 5-7                   |
| ЗШС               | 18-22                 |
| ОХЦ               | 8-12                  |
| Талловый пек      | 2,5-3,5               |

### Обсуждение

Достаточный расход ЗШС варьируется в пределах 18-22%. Такой расход увеличивает прочность на сжатие суглинистого грунта до 3,0-3,5 МПа.

Расход ОХЦ в пределах 8-12% дает максимальные прочностные характеристики. Увеличение содержания ОХЦ свыше 12% существенно не увеличивает прочность на изгибе.



Расход цемента (вариация в пределах 0-20%) предсказуемо дает увеличение прочности на сжатие и изгиб при росте расхода вяжущего в составе грунтобетона, при совместном введении вяжущего и ОХЦ прочность на изгиб растет быстрее, чем прочность на сжатие.

#### Выводы

В ходе проведенных экспериментов в рамках подбора содержания компонентов грунтобетона было исследовано влияние расхода отходов хризотилцемента (ОХЦ) на исследуемые механические характеристики (сжатие, изгиб) укрепляемого суглинистого грунта, оптимальное количество составляет 18-22 % масс.

Добавление ОХЦ от 8 до 12% дает максимум значений прочностных характеристик и позволяет рекомендовать полученные составы грунтобетонных смесей к применению для строительства дорог II класса.

#### Библиографический список

1. Гришина, В.А. Влияние гидрозолоотвалов ТЭЦ г. Новосибирска на окружающую среду / В.А. Гришина, В.Е. Леонов, В.С. Перехвальский // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. - №3. – С. 25-27.
2. Гришина, В.А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ / В.А. Гришина, В.Е. Леонов // Современные проблемы геодезии и оптики : сборник материалов LIII международная научно-технической конференции, посвященной 70-летию СГТА. – Новосибирск, 2003. – С. 16-17.
3. Моисеенко, В.Г. Мировой и отечественный опыт утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ (ТЭС, ГРЭС) / В.Г. Моисеенко, Р.А. Беляев // В кн.: Применение золошлаковых отходов ТЭЦ в различных областях народного хозяйства и решение связанных с этим экологических вопросов. – Благовещенск, 1998. – 81с.
4. Путилин, Е.И. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. – М., 2003. – 60 с.
5. Целыковский, Ю.К. Некоторые проблемы использования золошлаковых отходов ТЭС в России / Ю.К. Целыковский // Энергетик. – 1998. - №7. – С. 29-31.
6. Гришина, В.А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭЦ с получением экологически безопасной продукции / В.А. Гришина, В.Е. Леонов, В.С. Перехвальский // VI Сибирский научный вестник : Сборник материалов конференции. – Новосибирск, 2003. – С. 223-225.
7. Гришина, В. А. Использование комплексных добавок для укрепления грунтов в сельском дорожном строительстве / В. А. Гришина, В. Ф. Хританков, А. П. Пичугин // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 36-39. – EDN JXKGIX.
8. Пичугин, А. П. Физико-химические процессы в укрепленных грунтах / А. П. Пичугин, В. А. Гришина, И. К. Язиков // Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 41-43. – EDN KYLPWR.
9. Пичугин, А.П. Деформационные процессы в укрепленных грунтах / А.П. Пичугин, В.А. Гришина, И.К. Язиков // Экология и новые технологии в строительном материаловедении : международный сборник научных трудов. – Новосибирск, 2010. – С. 74-75.
10. Грунтобетон с добавками для строительства сельских дорог и сооружений сельскохозяйственных объектов / А. П. Пичугин, В. А. Бобыльская, С. И. Лещенко, А. В. Мазгалева // Теория и практика современной аграрной науки : Сборник III национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 28 февраля 2020 года. Том 3. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2020. – С. 703-707. – EDN EXSWVI.
11. Грунтобетон с добавками для строительства сельских дорог и сооружений / А. П. Пичугин, В. А. Бобыльская, С. И. Лещенко, А. В. Мазгалева // Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов : сборник научных трудов по материалам национальной Научно-технической конференции с международным участием, Новосибирск, 16–19 февраля 2021 года / Новосибирский государственный аграрный университет; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет; Российская академия естественных наук. – Новосибирск: Б. и., 2021. – С. 113-117. – EDN VZODHO.
12. Использование отходов производства в грунтобетонных смесях при строительстве зданий и сооружений сельскохозяйственного назначения / В. А. Вандышева, Р. Р. Файзулин, А. В. Мазгалева, В. А. Бобыльская // Интеллектуальный потенциал Сибири : 30-я Региональная научная студенческая конференция. Материалы конференции: в 4 частях, Новосибирск, 23–27 мая 2022 года. Том Часть 3. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. – С. 474-477. – EDN XHCNVA.
13. Мазгалева, А. В. Грунтобетоны и укрепленные грунты для строительства сельских дорог и сооружений сельскохозяйственных объектов / А. В. Мазгалева, В. А. Бобыльская, С. И. Лещенко // Теория и практика современной аграрной науки : Сборник V национальной (всероссийской) научной конференции с международным участием, Новосибирск, 28 февраля 2022 года. – Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета "Золотой колос", 2022. – С. 580-584. – EDN GJDECU.





Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена после рецензирования 09.11.2023; принята к публикации 09.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 09.11.2023; accepted for publication 09.11.2023.



Научная статья

УДК 624.131

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

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

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_47

## НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ КРУГЛОЙ ПЛИТЫ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

© Авторы, 2023

**БОСАКОВ Сергей Викторович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Математические методы в строительстве»

*Белорусский национальный технический университет  
(Беларусь, Минск)*

**КОЗУНОВА Оксана Васильевна**

кандидат технических наук, доцент, докторант, заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация зданий и сооружений» ФСН филиала БНТУ

*Белорусский национальный технический университет  
(Беларусь, Минск)*

**Аннотация.** В предлагаемой работе получила дальнейшее развитие теория нелинейных расчетов фундаментных конструкций на произвольном упругом основании. Круглая железобетонная плита под дымовую трубу ТЭЦ лежит на упругом полупространстве и сплошным образом, без трения и скольжения, контактирует с ним. Выполнены упругий и нелинейный расчеты этой конструкции под действием неосесимметричной вертикальной нагрузки при условии нахождения части плиты в одной плоскости.

Нелинейный расчет круглой плиты на упругом основании выполнялся итерационным путем метода Б.Н. Жемочкина в декартовой системе координат с использованием смешанного метода строительной механики. Причем, к традиционным уравнениям смешанного метода добавляются уравнения нахождения точек окружности нагружения плиты в одной плоскости от неизвестных внешних сил, распределенных по этой окружности. На первой итерации плита рассчитывается как линейно-упругая, однородная и изотропная, на последующих - как линейно-упругая, неоднородная и анизотропная на каждом участке Жемочкина. Прогибы плиты с защемленной в центре каждого участка нормалью в основной системе смешанного метода от действия вертикальной силы определяются методом Ритца при представлении прогибов в виде степенного полинома в выражении, которое удовлетворяет не только граничным условиям защемленной плиты по перемещениям, но и бигармоническому уравнению.

По полученным в результате упругого расчета перемещениям центров участков плиты методом конечных разностей определялись кривизны, а по ним - цилиндрические жесткости для каждого из направлений X и Y и крутильная жесткость. Для каждого участка на всех последующих итерациях используется зависимость "жесткость - кривизна", аппроксимированная нелинейной функцией, характер зависимости которой графически свидетельствует о нелинейно-упругой работе анизотропной плиты и ее деформировании с учетом трещинообразования и раскрытия трещин.

Приводятся численные примеры упругого и нелинейного расчетов железобетонной трубы ТЭЦ на упругом полупространстве. Алгоритмы приводимых выше решений реализованы при помощи компьютерной программы WolframMathematica 11.3.

**Ключевые слова:** упругое основание; железобетонная круглая плита; зависимость «жесткость-кривизна»; анизотропная плита: метод Жемочкина; нелинейный расчет; метод Ритца; прогибы плиты; метод конечных разностей; смешанный метод строительной механики; строительные конструкции

**Для цитирования:** Нелинейный расчет круглой плиты на упругом основании / С.В. Босаков, О.В. Козунова // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 47-51. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_47



## NON-LINEAR CALCULATION OF ROUND PLATE ON ELASTIC BASE

© The Author(s) 2023

**BOSAKOV Sergey Viktorovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
*Belarusian National Technical University*  
(Belarus, Minsk)

**KOZUNOVA Oksana Vasilyevna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the  
Department  
*Belarusian National Technical University*  
(Belarus, Minsk)

**Abstract.** In the proposed work, the theory of nonlinear calculations of foundation structures on an arbitrary elastic base is further developed. The round reinforced concrete slab for the chimney of the thermal power plant lies on an elastic half-space and continuously, without friction or sliding, contacts it. The elastic and nonlinear calculations of this structure are performed under the action of a non-symmetrical vertical load, provided that part of the plate is in the same plane.

The nonlinear calculation of the round plate on an elastic base was carried out iteratively by the B.N. Zhemochkin method in the Cartesian coordinate system using a mixed method of structural mechanics. Note here that equations for finding points of a plate loading circle in one plane from unknown external forces distributed over said circle are added to the traditional equations of the mixed method. At the first iteration, the plate is calculated as linear-elastic, homogeneous and isotropic, at the next iteration, it is calculated as linear-elastic, heterogeneous and anisotropic at each section of Zhemochkin. Deflections of a plate with a normal trapped in the center of each section in the main system of the mixed method from the effect of vertical force are determined by the Ritz method when representing deflections in the form of a power polynomial in an expression that satisfies not only the boundary conditions of the trapped plate by movements, but also the biharmonic equation.

Curvatures and cylindrical stiffnesses for each of directions X and Y, and torsional stiffness were determined from the movements of the centers of the plate sections obtained as a result of elastic calculation by the method of finite differences. For each section in all subsequent iterations, a stiffness-curvature relationship is used, approximated by a nonlinear function, the nature of which graphically indicates the nonlinear elastic work of the anisotropic plate and its deformation, taking into account crack formation and crack opening.

Numerical examples of elastic and nonlinear calculations of reinforced concrete pipes for thermal power plants on elastic half-space are given. The algorithms of the above solutions are implemented using the Wolfram Mathematica 11.3 computer program.

**Keywords:** elastic base; reinforced concrete round slab; stiffness-curvature relationship; anisotropic slab; Zhemochkin method; nonlinear calculation; Ritz method; plate deflections; finite difference method; mixed method of structural mechanics; building structures

**For citation:** Non-linear calculation of round plate on elastic base / S.V. Bosakov, O.V. Kozunova // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 47-51. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_47

Нелинейный расчет осесимметрично нагруженной круглой железобетонной плиты на упругом полупространстве детально рассмотрен в книге [1], где приводятся многочисленные результаты для перемещений и усилий. Для неосесимметрично нагруженной круглой плиты известны расчеты только в упругой стадии работы материала плиты [2], так как при нелинейном расчете неизвестно направление действия главных моментов и осей ортотропии в железобетонной плите при образовании трещин. Ниже нелинейный расчет неосесимметрично нагруженной круглой плиты на произвольном упругом выполняется итерационным путем, где на каждой итерации применяется способ

Б.Н. Жемочкина [3] для нахождения контактных напряжений между плитой и упругим основанием.

В работе принимается, что упругое основание линейно упруго, плиты – нелинейно упруго и для нее задана зависимость «Жесткость – кривизна» [4]. На контакте между плитой и основанием учитываются только нормальные напряжения. Также примем, что внешняя нагрузка и точки плиты на окружности ее нагружения лежат в одной плоскости [5]. Такая расчетная модель соответствует работе фундамента дымовой трубы ТЭЦ.

Надо отметить, что расчет выполняется в декартовых координатах, так как авторам не удалось найти выражение для энергии деформаций изгиба и

кручения ортотропных плит в полярных координатах.

Рассмотрим круглую плиту на упругом основании. Разобьем ее ортогональной сеткой на прямоугольные и треугольные участки Б.Н. Жемочкина (рис. 1). В центре каждого участка поставим жесткую вертикальную связь, через которую осуществляется контакт плиты с упругим основанием. Считаем, что в пределах каждого участка распределение контактных напряжений равномерное. Полученную многократно статически неопределимую систему рассчитываем смешанным методом строительной механики [6], приняв за неизвестные усилия  $X_k$  в разрезанных связях Б.Н.

Жемочкина, линейное  $u_0$  и угловые  $\varphi_x, \varphi_y$  перемещения введенного защемления в центре круглой плиты.

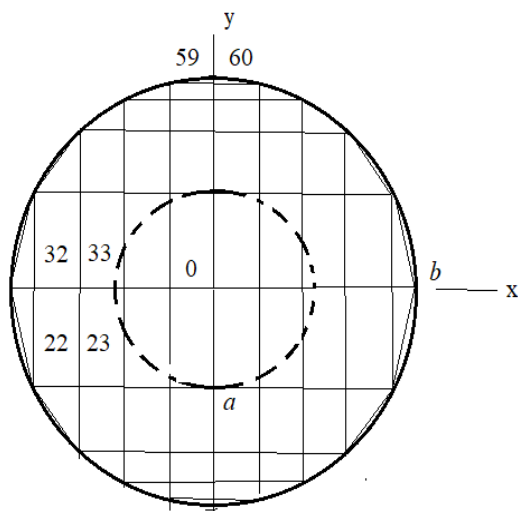


Рисунок 1. Принятая разбивка плиты на участки Б.Н. Жемочкина

(пунктиром показана окружность нагружения плиты силами, вызывающими нахождение точек окружности в одной плоскости)

К этим уравнениям смешанного метода добавляются уравнения нахождения точек окружности нагружения плиты в одной плоскости от неизвестных внешних сил  $Y_i$ , распределенных по этой окружности и имеющих равнодействующую силу  $R$  и момент  $M$ . Структура матрицы коэффициентов при неизвестных приведена на рисунке 2.

Так как в уравнениях метода сил способа Б.Н. Жемочкина коэффициенты при неизвестных усилиях в разрезанных связях определяются по формуле [3]

$$\delta_{i,k} = F_{i,k} + y_{i,k}, \quad (1)$$

Где  $F_{i,k}$  – перемещение точки  $i$  поверхности упругого основания от единичной силы, равномерно распределенной по участку  $i$  и

единичной силы, приложенной в точке  $k$  упругого основания. При итерациях эта величина не меняется и определяется для каждой модели упругого основания индивидуально по формулам, приведенным в монографии [6];  $y_{i,k}$  – вертикальное перемещение (прогиб) точки  $i$  круглой плиты с защемленной в центре нормалью от единичной вертикальной силы, приложенной в точке  $k$  этой плиты. При упругом расчете этот прогиб определяется по формуле, полученной методом Ритца [7].

$$y_{i,k} = \frac{1}{4\pi D} \left( \frac{x_i^2}{b^2} + \frac{y_i^2}{b^2} \right) \left( \frac{(x_k^2 + y_k^2)}{2(1+\nu)} + \frac{x_k(x_k^2 + y_k^2)}{b(3+\nu)} \frac{x_i}{b} + \frac{y_k(x_k^2 + y_k^2)}{b(3+\nu)} \frac{y_i}{b} \right) \quad (2)$$

где  $D, \nu$  – цилиндрическая жесткость плиты и коэффициент Пуассона материала плиты. Цилиндрическая жесткость принимается при упругом расчете одинаковой по осям  $OX$  и  $OY$ .

|    | $X_1$                                                                    | $X_{60}$ | $u_0$ | $\varphi_x$ | $\varphi_y$ | $Y_1$ | $Y_{12}$                                                        | $w_0$ | $\vartheta_x$ | $\vartheta_y$ |
|----|--------------------------------------------------------------------------|----------|-------|-------------|-------------|-------|-----------------------------------------------------------------|-------|---------------|---------------|
| 1  | Стандартные уравнения способа Б.Н. Жемочкина                             |          |       |             |             |       | Прогибы плиты с защемлением от распределенных по окружности сил |       |               |               |
|    |                                                                          |          |       |             |             |       | 0                                                               |       |               |               |
| 63 |                                                                          |          |       |             |             |       | 0                                                               |       |               |               |
| 75 | Уравнения нахождения точек окружности нагружения плиты в одной плоскости |          |       |             |             |       |                                                                 |       |               |               |
|    | $w_0 + \vartheta_x y + \vartheta_y x$                                    |          |       |             |             |       | 0                                                               |       |               |               |
| 78 | 0                                                                        |          |       |             |             |       | 0                                                               |       |               |               |

Рисунок 2. Структура системы разрешающих уравнений

На последующих итерациях для каждого участка  $i$  определялись цилиндрические жесткости  $D_X^i$  и  $D_Y^i$  и крутильная жесткость  $D_{XY}^i$  [8]

$$D_{XY}^i = \nu \sqrt{D_X^i D_Y^i}. \quad (3)$$

При определении цилиндрических жесткостей использовалась зависимость «Жесткость – кривизна» [4], которая для принятого в данной работе примера имеет вид, показанный на рисунке 3.

Кривизны определялись по найденным методом конечных разностей в результате упругого расчета перемещениям центров участков плиты [8]

$$\chi_x = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \quad \chi_y = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}. \quad (4)$$

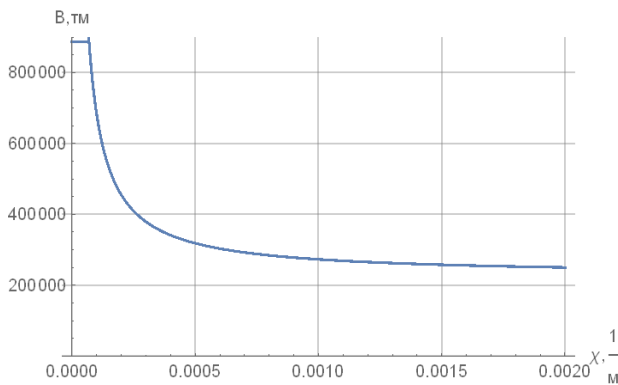


Рисунок 3. Зависимость «Жесткость – кривизна» для круглой железобетонной плиты

Таким образом, определялись цилиндрические жесткости каждого участка Б.Н. Жемочкина для использования на последующей итерации. Далее по методу Ритца прогибы анизотропной неоднородной круглой плиты представимы в следующем виде

$$W(x, y) = \left( \frac{x^2 + y^2}{b^2} \right) \left( A_{0,0} + A_{1,0} \frac{x}{b} + A_{0,1} \frac{y}{b} \right), \quad (5)$$

где  $A_{i,k}$  – неизвестные коэффициенты, зависящие от размеров и жесткости плиты, внешней нагрузки.

Определяем функционал полной энергии плиты и действующей на нее нагрузки [9]

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{60} \left[ D_x^i \left( \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \right)^2 + 2\nu D_x^i \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} + D_y^i \left( \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} \right)^2 + 4D_{xy} \left( \frac{\partial^2 W_i}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \Delta S_i - \left( \frac{x_k^2 + y_k^2}{b^2} \right) \left( A_{0,0} + A_{1,0} \frac{x_k}{b} + A_{0,1} \frac{y_k}{b} \right), \quad (k=1, \dots, 12) \quad (6)$$

где  $\Delta S_i$  – площадь участка Б.Н. Жемочкина с номером  $i$ .

Для каждого из 12 положений неизвестных внешних сил, приложенных по окружности ( $k=1, \dots, 12$ ), решалась система линейных алгебраических уравнений, полученная дифференцированием функционал полной энергии плиты по неизвестным коэффициентам  $A_{i,k}$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial A_{0,0}} = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial A_{1,0}} = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial A_{0,1}} = 0; \end{cases} \quad (7)$$

и определялись эти коэффициенты (5), что позволяло найти прогибы неоднородной анизотропной плиты при каждом из этих положений неизвестных внешних сил, приложенных по окружности. Далее решалась система уравнений (см. рисунок 2) и определялись усилия в связях Б.Н. Жемочкина и внешние силы, распределенные по окружности плиты и вызывающие нахождение точек этой окружности в одной плоскости. Потом этот

итерационный процесс повторялся. Определялись перемещения центров участков Б.Н. Жемочкина, по ним кривизны и жесткости каждого участка. Методом Ритца определялись прогибы плиты с защемленной нормалью и т.д.

**Пример.** Для круглой железобетонной плиты диаметром  $2b=18\text{ м}$ , толщиной  $h=1.5\text{ м}$  из бетона В25 ( $C^{25/30}$ ) внешняя нагрузка с равнодействующими  $R=3827\text{ т}$  и  $M=5747\text{ тм}$  распределена по окружности диаметром  $2a=11.2\text{ м}$ . Плита лежит на упругом полупространстве с упругими постоянными  $E_0=3000\text{ т/м}^2$ ;  $\nu_0=0.33$ . Плита разбивалась на 60 участков Б.Н. Жемочкина.

На рисунке 4 приводятся изолинии равных перемещений для упругого расчета и нелинейного после второй итерации. Можно заметить, что они почти одинаковы.

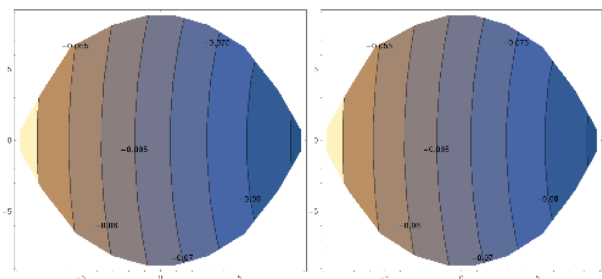


Рисунок 4. Изолиний равных вертикальных перемещений (м) для упругого расчета (слева) и нелинейного расчета после второй итерации (справа)

На рисунке 5 показаны усилия в 12 точках плиты, вызывающие вертикальные перемещения этих точек плиты, лежащие в одной плоскости. При итерациях почти не меняются.

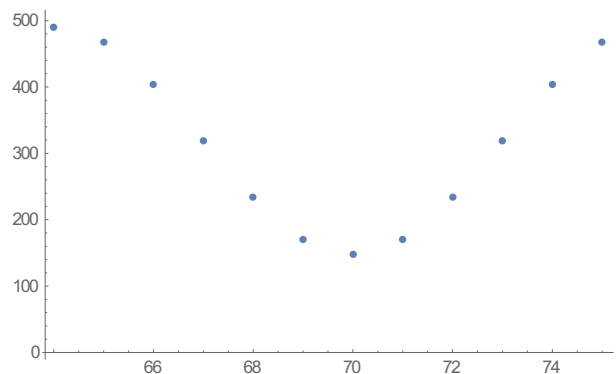


Рисунок 5. Вертикальные силы (т), приложенные к 12 точкам плиты, вызывающие перемещения этих точек, лежащие в одной плоскости

Эпюры изгибающих моментов  $M_x$  в плите по оси  $OX$  для упругого расчета и после второй итерации приведены на рисунке 6.

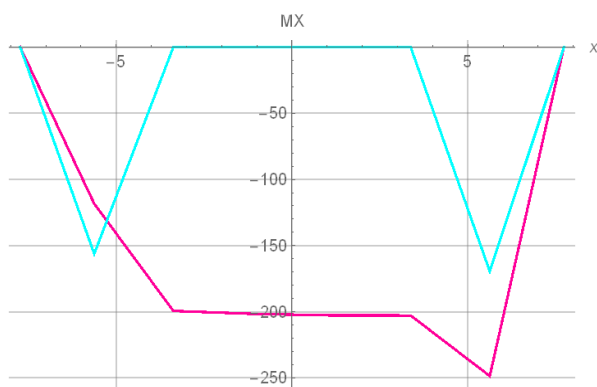


Рисунок 6. Изгибающие моменты (тм) вдоль оси  $Ox$  для упругого расчета (красный цвет) и нелинейного (голубой цвет) после второй итерации

#### Выводы

1. Предложена методика нелинейного расчета круглой железобетонной плиты на упругом произвольном основании при неосесимметричной вертикальной нагрузке при условии нахождения части плиты в одной плоскости. Расчет основан на способе Б.Н. Жемочкина, где на каждой итерации по зависимости «Жесткость – кривизна» уточняются жесткостные характеристики для каждого участка Б.Н. Жемочкина. Выбор модели упругого основания определяет вид функции влияния  $F_{i,k}$  в соотношении (1) и ее величину, количественно влияет на результат упругого и нелинейного расчетов, что предполагает дальнейшее исследование.

2. В работе показано, что при итерациях незначительно меняются величины внешней нагрузки, вызывающие нахождение части плиты в

одной плоскости. Также почти не меняются вертикальные перемещения плиты.

#### Библиографический список

1. Соломин В.И., Шматов С.Б. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций. - М., Стройиздат, 1986. 208 с.
2. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. - М., Стройиздат, 1984. 679 с.
3. Жемочкин Б.Н., Сеницын А.П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. - М., Госстройиздат, 1962. 239 с.
4. Козунова О.В. Нелинейный расчет железобетонной балки на упругом основании с помощью зависимости «жесткость-кривизна» // Строительная механика и расчет сооружений. №1(300). 2022. С. 37-46.
5. Босаков С.В., Котов Ю.Н. Контактная задача для пластинки при условии ограничений на ее некоторые перемещения // Механика. Исследования и инновации. 2021. Вып. 14. С. 17-23.
6. Босаков С.В. Статические расчеты плит на упругом основании. - Мн.: БНТУ, 2002. 128 с.
7. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. - М., Высшая школа, 1990. 400 с.
8. Варвак П.М. Развитие и приложение метода сеток к расчету пластинок. Ч.1. - Киев: Изд-во АН УССР, 1949. 136 с.
9. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. - М.: Наука, 1977. 416 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 25.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 25.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья  
УДК 691.175.2  
ГРНТИ: 67.09 Строительные материалы и изделия  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_52

## ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ СМОЛ НА ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭТИЛЕНВИНИЛАЦЕТАТА

© Авторы 2023  
SPIN: 7085-9345  
AuthorID: 925030  
ScopusID: 57206276747

**ВОЛОЦКОЙ Алексей Николаевич**  
старший преподаватель кафедры Строительных конструкций и машин  
*Вятский государственный университет*  
(Россия, Киров, e-mail: alexeyqwerty@mail.ru)

SPIN: 6010-7921  
ORCID: 0000-0002-1069-2413  
ResearcherID: N-3233-2016  
ScopusID: 57191526691

**АВДОНИН Валерий Викторович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры Прикладной механики  
*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева*  
(Россия, Саранск, e-mail: avdoninvalerii@bk.ru)

**Аннотация.** Данная работа посвящена проблеме разработки вибропоглощающих полимерных композиционных материалов эффективных в широком температурном интервале. В статье изучены вопросы, касающиеся совместимости компонентов вибропоглощающих полимерных материалов. Выполнен анализ результатов инфракрасной спектроскопии полимерных композитов на основе этиленвинилацетата, модифицированных смолами. Методом Оуэнса-Вендта вычислены значения свободной поверхностной энергии смол (алкилфенолоформальдегидная смола и эфир канифоли глицериновый). Проведена оценка величины адгезионного взаимодействия для системы «полимер-модификатор» в зависимости от степени полярности модификатора. Произведено сравнение результатов исследования динамических свойств полимерных композитов на основе этиленвинилацетата, модифицированных смолами, с работой адгезии полимера и модификатора. Установлено, что полярность модификатора существенно влияет на вибропоглощающие характеристики полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата. Показано, что через прочность адгезионной связи можно установить наиболее оптимальные структурообразующие компоненты, необходимые для разработки вибропоглощающих полимерных материалов с высоким уровнем диссипативных свойств.

**Ключевые слова:** этиленвинилацетат; тангенс угла механических потерь; динамический механический анализ; адгезия; вибропоглощающий материал; смола; полярность; полимер

**Для цитирования:** Влияние полярности смол на вибропоглощающие характеристики полимерных материалов на основе этиленвинилацетата / А.Н. Волоцкой, В.В. Авдонин // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 52-57. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_52





Original article

## THE INFLUENCE OF RESIN POLARITY ON THE DAMPING CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIALS BASED ON ETHYLENE-VINYL ACETATE

© The authors 2023

**VOLOTSKOY Alexey Nikolaevich**

senior lecturer at the Department of Building Structures and Machinery  
*Vyatka State University*  
(Russia, Kirov, e-mail: alexeyqwerty@mail.ru)

**AVDONIN Valeriy Viktorovich**

Candidate of Technical Science, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics  
*National Research Mordovian Ogarev State University*  
(Russia, Saransk, e-mail: avdoninvalerii@bk.ru)

**Abstract.** This work is devoted to the problem of developing damping polymer composite materials that are effective in a wide temperature range. The article examines issues related to the compatibility of components of damping polymer materials. An analysis of the results of infrared spectroscopy of polymer composites based on ethylene-vinyl acetate modified with resins was performed. The values of the free surface energy of resins (alkylphenol-formaldehyde resin and glycerin rosin ester) were calculated using the Owens-Wendt method. The magnitude of the adhesion interaction for the "polymer-modifier" system was assessed depending on the degree of polarity of the modifier. The results of a study of the dynamic properties of polymer composites based on ethylene-vinyl acetate modified with resins were compared with the work of adhesion of the polymer and the modifier. It has been established that the polarity of the modifier significantly affects the damping characteristics of polymer composite materials based on ethylene-vinyl acetate. It is shown that through the strength of the adhesive bond, it is possible to establish the most optimal structure-forming components necessary for the development of damping polymer materials with a high level of dissipative properties.

**Keywords:** ethylene-vinyl acetate; mechanical loss tangent; dynamic mechanical analysis; adhesion; damping material; resin; polarity; polymer

**For citation:** The influence of resin polarity on the damping characteristics of polymer materials based on ethylene-vinyl acetate / A.N. Volotskoy, V.V. Avdonin // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 52-57. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_52

### Введение

Развитие техники происходит стремительными темпами. Меняются характеристики инженерного оборудования, машин, что в свою очередь приводит к повышению вибрации и шума. Данная проблема затрагивает и строительную отрасль, где элементами, находящимися под действием вибрационной нагрузки, являются полы, климатическое оборудование, лифтовые установки. В связи с этим весьма актуально создание вибропоглощающих материалов, обладающих высокими динамическими и механическими характеристиками. Полимерные композиты имеют широкое применение в качестве вибропоглощающих материалов [1]. Диссипативные свойства таких материалов во многом зависят от полимерной основы. Демпфирующая способность полимера определяется интенсивностью и шириной пика тангенса угла механических потерь ( $\text{tg}\delta$ ). На основании многочисленных публикаций установлено, что вибропоглощающие материалы являются эффективными, когда значение  $\text{tg}\delta$  не менее 0,3 [2-3]. Большинство вибропоглощающих

материалов не удовлетворяют данному требованию. Для улучшения диссипативных свойств полимерных композитов используют модификаторы [4-6]. Эффективность таких добавок определяется хорошей смешиваемостью и сродством с полимером. В работе в качестве модификаторов применялись два типа смол – алкилфенолформальдегидная смола (АФФС) и эфир канифоли глицериновый (ЭК). На границе «полимер-модификатор» возникает смачивание, которое приводит к межфазной адгезии. Данный процесс сопровождается уменьшением свободной поверхностной энергии системы [7]. Совместимость модификаторов с полимером можно оценить через прочность адгезионной связи. Это позволит спрогнозировать, какой из модификаторов будет наиболее оптимальным для улучшения вибропоглощающих свойств полимерного композита.

### Материалы и методы

Этиленвинилацетат (ЭВА) марки LG EVA ES 28005 с процентным содержанием винилацетата 28%

использовался как полимерная основа исследуемых композитов.

При изготовлении экспериментальных образцов в качестве пластификатора использовался хлорпарафин ХП-470 (ХП) ТУ 2493-379-05763441-2002. Объемное содержание хлорпарафина в составе смеси 40%.

Мел применялся как инертный наполнитель. Объемное содержание наполнителя в составе полимерной композиции  $50 \pm 1\%$ .

В качестве модификаторов были использованы два типа смол: алкилфенолформальдегидная смола SP-1045; эфир канифоли глицериновый.

Составы и марки исследуемых композитов приведены в таблице 1.

Полимерные смеси изготавливали при помощи лабораторного смесителя периодического действия с тангенциальными роторами. Первоначально перемешивали полимер при температуре плюс  $120^\circ\text{C}$  при числе оборотов 44 об/мин в течение 20 минут. Далее полимер смешивали с пластификатором, добавляли наполнитель, модификатор и затем раскатывали на вальцах до получения материала однородной толщины.

Динамический механический анализ (ДМА) экспериментальных образцов в виде диска толщиной

2 мм был выполнен с использованием прибора Netzsch DMA 242 C. Тангенс угла механических потерь определяли в диапазоне температур от минус  $70^\circ\text{C}$  до плюс  $30^\circ\text{C}$  при частоте 1 Гц.

Для регистрации ИК спектров использовался ИК Фурье-спектрометр.

## Результаты и обсуждение

Результаты исследования динамических свойств композитов на основе ЭВА, модифицированных смолами представлены на рис. 1. Как и ожидалось, добавление смол приводит к росту пика тангенса угла механических потерь. Использование АФФС в качестве модификатора для композита на основе ЭВА позволяет увеличить максимум  $\text{tg} \delta$  сильнее, чем эфир канифоли. Добавление модификаторов содержанием до 10 мас.ч. включительно приводит к изоляции полярных групп ЭВА, смещая тем самым температуру стеклования и максимум  $\text{tg} \delta$  в сторону отрицательных температур (рис. 1а). Кроме того, анализ результатов показал, что АФФС и эфир канифоли имеют температуру стеклования намного больше, чем ЭВА (см. табл. 2). Поэтому добавление данных модификаторов содержанием 20 мас.ч. и выше вызывает снижение температуры стеклования композита на основе ЭВА (рис. 1б, в).

Таблица 1. Составы и марки исследуемых композитов

| Марка смеси      | Полимер      | Пластификатор | Наполнитель  | Модификатор   |             |
|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-------------|
|                  | ЭВА, мас. ч. | ХП, мас. ч.   | Мел, мас. ч. | АФФС, мас. ч. | ЭК, мас. ч. |
| Без модификатора | 100          |               | 241          | -             | -           |
| АФФС 10 мас.ч.   | 90           |               | 233          | 10            | -           |
| АФФС 20 мас.ч.   | 80           |               |              | 20            | -           |
| АФФС 30 мас.ч.   | 70           |               |              | 30            | -           |
| ЭК 10 мас.ч.     | 90           |               | 237          | -             | 10          |
| ЭК 20 мас.ч.     | 80           |               |              | -             | 20          |
| ЭК 30 мас.ч.     | 70           |               |              | -             | 30          |

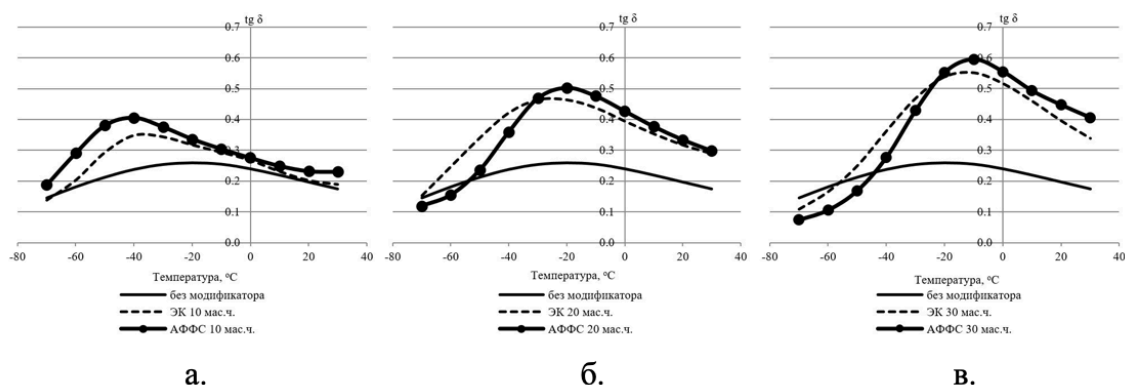


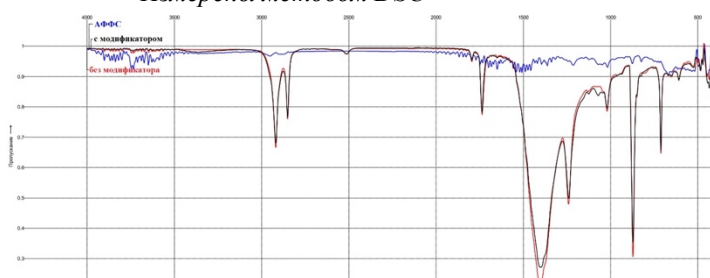
Рис. 1. Тангенс угла механических потерь композитов на основе ЭВА:  
а. – содержание модификатора 10 мас.ч.; б. – содержание модификатора 20 мас.ч.; в. – содержание модификатора 30 мас.ч.

Увеличение пика  $\text{tg}\delta$  композита при добавлении смол происходит из-за образования физических связей между гидроксильными группами смол и боковыми группами ЭВА. По сравнению с химическими (ковалентными) связями физические связи являются довольно слабыми, легко разрушаются и преобразуются, расходуя при этом энергию. В результате чего значение  $\text{tg}\delta$  увеличивается и вибропоглощающие свойства полимерного композита улучшаются. Методом инфракрасной спектроскопии установлено, что между гидроксильными группами смол и боковыми группами ЭВА не возникают химические связи (рис. 2, 3).

Таблица 2. Характеристики модификаторов и этиленвинилацетата

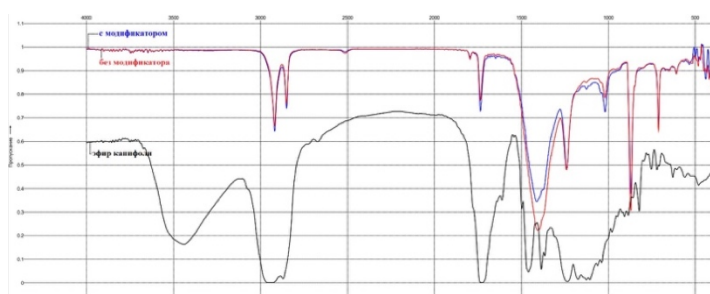
| Наименование | Параметр растворимости $\delta$ , (МПа) <sup>0,5</sup> | Источник | Температура стеклования $T_g$ , °C |
|--------------|--------------------------------------------------------|----------|------------------------------------|
| АФФС         | 18,73                                                  | [8]      | 69*                                |
| ЭК           | ≈16,38                                                 |          | 67*                                |
| ЭВА          | ≈17,5                                                  | [9]      | -34**                              |

\*Измерены методом DSC



\*\*Измерены методом ДМА

Рис. 2. ИК-спектроскопия композита на основе



ЭВА, модифицированного АФФС

Рис. 3. ИК-спектроскопия композита на основе ЭВА, модифицированного эфиром канифоли

Согласно данным таблицы 2 АФФС является полярной термореактивной смолой, а эфир канифоли – менее полярной смолой. Этиленвинилацетат, за счет содержания в своей структуре полярных ацетатных групп относится к полярным сополимерам. По этой причине межмолекулярные физические взаимодействия в системе ЭВА-АФФС проявляются сильнее, чем у ЭВА-эфир канифоли.

Количественно оценить силу межмолекулярного физического взаимодействия между ЭВА и модификаторами можно через прочность адгезионной связи пропорционально обратимой работе адгезии  $W_{12}$  [10-12]:

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1)$$

где  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – свободная поверхностная энергия (СПЭ) компонентов;  $\gamma_{12}$  – свободная поверхностная энергия на границе раздела фаз.

Свободная поверхностная энергия любого материала согласно методу Оуэнса и Вендта состоит из двух компонентов [13-14]:

1. Дисперсионная составляющая СПЭ ( $\gamma^d$ );
2. Полярная составляющая СПЭ ( $\gamma^p$ );

Свободная поверхностная энергия на границе раздела фаз  $\gamma_{12}$  определяется следующим выражением:

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2 \cdot (\gamma_1^d \cdot \gamma_2^d)^{0,5} - 2 \cdot (\gamma_1^p \cdot \gamma_2^p)^{0,5} \quad (2)$$

Свободная поверхностная энергия ЭВА приведена в таблице 3.

Таблица 3. Свободная поверхностная энергия этиленвинилацетата

| Компонент | $\gamma^d$ , мДЖ/м² | $\gamma^p$ , мДЖ/м² | Свободная поверхностная энергия $\gamma$ , мДЖ/м² | Источник |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------------------------------------|----------|
| ЭВА       | 33,4                | 2,51                | 35,9                                              | [15]     |

Полярную составляющую и дисперсионную составляющую СПЭ модификаторов определяли через уравнение (3) по данным измерений контактных углов смачивания двух жидкостей (вода и глицерин):

$$\gamma_L \cdot (1 + \cos\theta) = 2 \cdot [(\gamma_S^d \cdot \gamma_L^d)^{0,5} + (\gamma_S^p \cdot \gamma_L^p)^{0,5}] \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол смачивания;  $\gamma_S^d$ ,  $\gamma_S^p$  – составляющие сил СПЭ твердого тела;

$\gamma_L^d$ ,  $\gamma_L^p$  – составляющие сил СПЭ жидкости.

Данные по свободной поверхностной энергии жидкостей приведены в таблице 4.

Таблица 4. Свободная поверхностная энергия жидкостей

| Жидкость | $\gamma^d$ , мДЖ/м² | $\gamma^p$ , мДЖ/м² | Свободная поверхностная энергия $\gamma$ , мДЖ/м² |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------------------------------------|
| Вода     | 21,8                | 51                  | 72,8                                              |
| Глицерин | 37                  | 26                  | 63                                                |

Полученные результаты свободной поверхностной энергии модификаторов представлены в таблице 5.

Таблица 5. Свободная поверхностная энергия модификаторов

| Модификатор   | $\gamma^d$ , мДЖ/м <sup>2</sup> | $\gamma^p$ , мДЖ/м <sup>2</sup> | Свободная поверхностная энергия $\gamma$ , мДЖ/м <sup>2</sup> |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| АФФС          | 28,7                            | 7,6                             | 36,3                                                          |
| Эфир канифоли | 25,8                            | 5,8                             | 31,6                                                          |

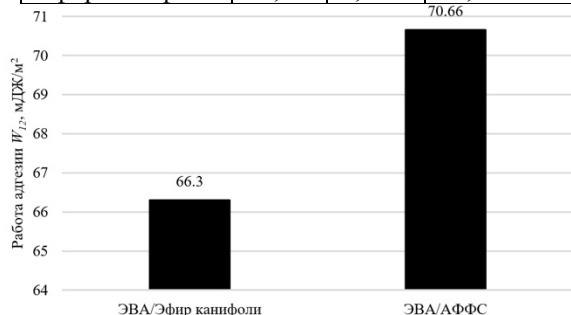


Рис. 3. Работа адгезии в системе ЭВА/модификатор

Работа адгезии ЭВА и модификаторов приведена на рис. 3. Откуда видно, что АФФС имеет прочность адгезионной связи с ЭВА выше, чем эфир канифоли. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследования динамических свойств, представленными на рис. 1.

#### Выводы

1. По результатам проведенных исследований установлены экспериментальные зависимости динамических свойств от типа модификатора для вибропоглощающих композиционных полимерных материалов на основе ЭВА.
2. Выяснено, что эффективность модификаторов зависит от силы межмолекулярного взаимодействия с полимером.
3. Количественно оценена сила межмолекулярного физического взаимодействия между ЭВА и модификаторами через прочность адгезионной связи.
4. Полученный результат наглядно показывает взаимосвязь между работой адгезии структурообразующих компонентов к полимеру у вибропоглощающего полимерного композита и его динамическими характеристиками.
5. Результаты исследования могут быть использованы при разработке вибропоглощающих полимерных материалов с высокими диссипативными свойствами в широком диапазоне температур.

#### Библиографический список

1. Chakraborty, B.C. Polymers for Vibration Damping Applications / B.C. Chakraborty, D. Ratna. – Elsevier, 2020. – 348 p.
2. Wu, J.H. Reinforcement of dynamically vulcanized EPDM/PP elastomers using organoclay fillers: dynamic properties of rubber vibration isolators and antivibration performance / J.H. Wu, C.H. Li, H.T. Chiu, Z.J. Shong, P.A. Tsai // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2009. – Vol. 22, №5. – P. 503–509.

3. He, X. Damping properties of ethylene-vinyl acetate rubber/poly(lactic acid) blends / X. He, M. Qu, X. Shi // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 4, №3. – P. 15–22.

4. Chang, S. Effects of phenolic oligomer on the dynamic mechanical properties of nitrile butadiene rubber / S. Chang, H. Pan, X. Lihuan, Z. Cheng // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 335–336. – P. 120–123.

5. Caiyun, W. Dynamic mechanical properties in blends of poly (styrene-b-isoprene-b-styrene) with aromatic hydrocarbon resin / W. Caiyun, W. Guozhang, W. Chifei // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 102, № 5. – P. 4157–4164.

6. Chang, S. Effects of chemical structure of phenolic resin on damping properties of acrylate rubber-based blends / S. Chang, Z. Cunbin, X. Lihuan, Z. Cheng // Journal of Macromolecular Science. – 2015. – Vol. 54, № 2. – P. 177–189.

7. Леонов, А.П. Определение работы адгезии в системе межвитковой изоляции / А.П. Леонов, А.С. Супуева // Интернет-журнал Науковедение. – 2013. – № 3(16). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/24tvn313.pdf>

8. Галимзянова, Р. Ю. Влияние модификаторов на свойства неотверждаемых композиций на основе бутилкаучука / Р. Ю. Галимзянова, Т. В. Макаров, С. И. Вольфсон // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 6. – С. 168–172.

9. Волоцкой, А.Н. Оценка влияния полярности пластификатора на динамические свойства полимерных материалов на основе этиленвинилацетата / А.Н. Волоцкой, Ю.В. Юркин, В.Д. Черкасов, В.В. Авдонин, И.А. Мансурова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – Т. 3. – №9. – С. 15–23.

10. Rothon, R. Fillers for polymer application / R. Rothon. – Switzerland: Springer, 2017. – 489 p.

11. Żenkiewicz, M. Methods for the calculation of surface free energy of solids / M. Żenkiewicz // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 24, № 1. – P. 137–145.

12. Szczes, A. Magnetic Field Effect on Water Surface Tension in Aspect of Glass and Mica Wettability / A. Szczes, E. Chibowski, E. Rzeznik // Colloids Interfaces. – 2020. – Vol. 4(3), № 37. – P. 1–12.

13. Stöckelhuber, K.W. Contribution of physico-chemical properties of interfaces on dispersibility, adhesion and flocculation of filler particles in rubber / K.W. Stöckelhuber, A. Das, R. Jurk, G. Heinrich // Polymer. – 2010. – Vol. 51, № 9. – P. 1954–1963.

14. Xing, Yw. Hydration film measurement on mica and coal surfaces using atomic force microscopy and interfacial interactions / Yw. Xing, Xh. Gui, Yi. Cao // Journal of Central South University. – 2018. – Vol. 25. – P. 1295–1305.

15. Fenouillot, F. Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends / F. Fenouillot, P. Cassagnau, J.-C. Majeste // Polymer. – 2009. – Vol. 5, № 6. – P. 1333–1350



---

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00301, <https://rscf.ru/project/21-79-00301/>.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 19.10.2023; одобрена после рецензирования 17.11.2023; принята к публикации 17.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 19.10.2023; approved after reviewing 17.11.2023; accepted for publication 17.11.2023.



Научная статья

УДК 691.32:691.54

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_58

## ВЛИЯНИЕ КАРБАМИД-СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ<sup>1</sup>

© Авторы 2023

SPIN: 4265-7935

ORCID 0000-0002-8520-4453

ResearcherID: AAB-3899-2021

Scopus ID: 57076182100

**ИЛЬИНА Лилия Владимировна**

доктор технических наук, профессор

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Новосибирск, e-mail: nsklika@mail.ru)*

SPIN: 4888-2644

Scopus ID: 6602628852

**БЕРДОВ Геннадий Ильич**

доктор технических наук, профессор

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Новосибирск, e-mail: stf@sibstrinl.ru)*

**ДЬЯКОВА Ксения Сергеевна**

аспирант, кафедра строительных материалов, стандартизации и сертификации

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

**КОЗОРЕЗ Дмитрий Иванович**

магистрант

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

**Аннотация.** Рассмотрена возможность применения карбамид-содержащей добавки для упрочнения цементных конгломератов. Наибольшее увеличение прочности цементного камня получено при добавлении карбамида в количестве 1 % мас. от портландцемента. Прочность при этом увеличивается на 33,7 - 56,8 % в зависимости от срока твердения. Необходимо отметить большее ускорение набора прочности цементным камнем в ранние сроки твердения, чем в стандартном возрасте.

**Ключевые слова:** карбамид; цемент; строительные материалы; гидросиликаты кальция; портландит; повышение прочности

**Для цитирования:** Влияние карбамид-содержащих добавок на прочность цементного камня / Л.В. Ильина, Г.И. Бердов, К.С. Дьякова, Д.И. Козорез // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 58-61. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_58

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



Original article

## EFFECT OF CARBAMIDE-CONTAINING ADDITIVES ON CEMENT STONE STRENGTH

© The Author(s) 2023

**ILINA Liliia Vladimirovna**

doctor of technical sciences, professor

*Novosibirsk state University of architecture and civil engineering  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: nsklika@mail.ru)*

**BERDOV Gennadii Ilich**

Applicant

doctor of technical sciences, professor

*Novosibirsk state University of architecture and civil engineering  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: stf@sibstrinl.ru)*

**DYAKOVA Ksenia Sergeevna**

PhD Candidate

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

**KOZOREZ Dmitry Ivanovich**

master's student

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

**Abstract.** The article considers the possibility of using a carbamide-containing additive to strengthen cement conglomerates. The greatest increase in the strength of cement stone was obtained by adding carbamide in an amount of 1% wt. to Portland cement. At the same time, the strength increases by 33.7–56.8%, depending on the hardening period. It is necessary to note a greater acceleration of the strength gain of the cement stone in the early stages of hardening than at a standard age.

**Keywords:** carbamide; cement; calcium hydrosilicates; portlandite; strength enhancement

**For citation:** Effect of carbamide-containing additives on cement stone strength / L.V. Ilyina, G.I. Berdov, K.S. Dyakova, D.I. Kozorez // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 58-61. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_58

### Введение

Как известно, карбамид  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  может использоваться в составе противоморозных добавок как самостоятельно, так и совместно с нитрит-нитратом кальция и нитрат-нитрид-хлоридом кальция. В качестве противоморозной добавки мочевины успешно используется в районах с относительно мягким климатом, при котором температура бетона обычно бывает не ниже минус 10 °С. Карбамид пластифицирует бетонную смесь и обуславливает при твердении бетона стабильный темп образования цементного камня [1-2].

При использовании мочевины совместно с нитрит-нитратом кальция и нитрат-нитрид-хлоридом кальция при твердении бетона в температурном интервале от минус 11 до минус 16 °С рекомендуемое количество таких добавок составляет 15 – 18 % от массы воды затворения. При этом отношение количества мочевины к остальным компонентам добавки составляет по массе (по сухому веществу) 1:1. Это соответствует молярному отношению 3:1, то

есть по количеству молей вещества в растворе мочевины превышает остальные компоненты добавки в 3 раза. Добавки, содержащие карбамид, рекомендуется применять практически при любых конструкциях бетонных изделий и условиях эксплуатации [1].

При одинаковой степени гидратации алита в портландцементе прочность цементного камня при введении добавок, содержащих карбамид существенно выше, чем у образцов без добавок. Так при степени гидратации 40 % она составляет соответственно 15 и 5 МПа. В работе [1] это связывают с образованием при введении добавок первичного структурного каркаса, образуемого гидросиликатами кальция.

Следует отметить, как указано в работе [1], что использование добавок, содержащих мочевины, обеспечивает более высокую морозостойкость, чем при введении добавки без мочевины.

Ульянов А.В. и др. отмечают, что с увеличением количества карбамида порядок реакции изменяется с





2 при содержании его 4,5 % до 2,7 при содержании 6 %. При этом характерно изменение энергии активации реакции. При содержании добавки 3; 4,5 и 6 % она составляет соответственно 70; 80 и 100-160 кДж/моль. Таким образом, с увеличением содержания добавки карбамида повышается энергия активации  $\text{CO}_2$  [3].

Однако физико-химическая природа действия добавки на упрочнение камня изучена недостаточно.

#### Материалы и методы

В качестве вяжущего в работе использовался портландцемент без минеральных добавок типа ЦЕМ 0, класса по прочности 42,5, нормально твердеющий производства АО «Искитимцемент» (Новосибирская область, г. Искитим).

Химический состав портландцементного клинкера указан в таблице 1. Техническая характеристика приведена в таблице 2.

Таблица 1 - Химический состав портландцементного клинкера, %

| $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{SO}_3$ | $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ | $\text{Cl}^-$ | Нерастворимый остаток |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------------------------|---------------|-----------------------|
| 20,20          | 4,86                    | 4,02                    | 64,22        | 1,69         | 2,71          | 0,76                                       | 0,01          | 0,37                  |

Таблица 2. Техническая характеристика портландцемента

| № п/п | Наименование показателя                              | Требуемое значение | Фактическое значение |
|-------|------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|
| 1     | Тонкость помола, %                                   | не нормируется     | 3,0                  |
| 2     | Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$         | не нормируется     | 356                  |
| 3     | Сроки схватывания: начало, мин                       | не ранее 60        | 190                  |
|       | конец, мин                                           | не нормируется     | 230                  |
| 4     | Равномерность изменения объема                       | не более 10        | 0,1                  |
| 5     | Нормальная густота, %                                | не нормируется     | 25,00                |
| 6     | Предел прочности на изгиб: - в возрасте 2 суток, МПа | не нормируется     | 4,4                  |
|       | - в возрасте 28 суток, МПа                           | не нормируется     | 8,2                  |
| 7     | Предел прочности на сжатие: - после ТВО, МПа         | более 30,0         | 41,5                 |
|       | - в возрасте 2 суток, МПа                            | не менее 10,0      | 23,7                 |
|       | - в возрасте 28 суток, МПа                           | от 42,5 до 62,5    | 51,3                 |

#### Результаты (эксперимент)

Карбамид  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  вводили в количестве от 0,5 до 3 % от массы цемента совместно с водой затворения (табл.3). Из цементного теста стандартной консистенции формовали образцы кубики с ребром 20 мм, которые твердели как в условиях тепловлажностной обработки, так и в нормальных условиях в течение 3, 7, 14 и 28 суток.

Его введение позволяет значительно повысить прочность цементного камня. Оптимальная добавка составляет 0,5-1,0 %.

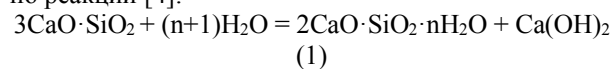
Таблица 3. Влияние добавки карбамида на свойства цементного камня

| Количество добавки, % | Прочность (МПа) в возрасте, суток |      |      |      |      |
|-----------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|
|                       | ТВО                               | 3    | 7    | 14   | 28   |
| 0                     | 50,8                              | 36,7 | 42,8 | 50,6 | 61,4 |
| 0,5                   | 61,7                              | 53,9 | 61,5 | 68,9 | 77,0 |
| 0,75                  | 62,3                              | 55,9 | 68,3 | 69,2 | 80,5 |
| 1,0                   | 58,7                              | 54,5 | 67,1 | 74,2 | 82,1 |
| 1,5                   | 48,1                              | 49,7 | 58,6 | 66,8 | 73,7 |
| 2,0                   | 48,8                              | 49,9 | 58,8 | 66,7 | 73,0 |
| 3,0                   | 48,2                              | 46,7 | 58,8 | 63,8 | 71,4 |

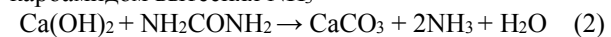
Анализ экспериментальных данных показал, что введение карбамида позволяет значительно повысить прочность цементного камня. Наибольшее увеличение прочности получено при добавлении карбамида в количестве 1 % мас. от портландцемента. Прочность при этом увеличивается на 33,7 - 56,8 % в зависимости от срока твердения. Необходимо отметить большее ускорение набора прочности цементным камнем в ранние сроки твердения, чем в стандартном возрасте. Это может быть обусловлено следующим.

При гидратационном твердении цемента величайшую роль играет взаимодействие с водой трехкальциевого силиката (алита)  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Его содержание в портландцементе составляет 50 - 65 % мас.

Взаимодействие  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  с водой протекает по реакции [4]:



Образующийся гидроксид кальция является сильным основанием. Он будет вступать в реакцию с карбамидом вытесняя  $\text{NH}_3$



Проведем термодинамический анализ взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  с образованием  $\text{CaCO}_3$ . Свойства участвующих в реакции (2) соединений приведены в таблице 3.

Изменение их в результате реакции определено как разность суммарной величины продуктов реакции к исходному веществу. Например, для энергии Гиббса [6-7].

$$\Delta G_{\text{реак}} = \sum \Delta G_{\text{прод}} - \sum \Delta G_{\text{исх}} \quad (3)$$

Определение изменения термодинамических свойств в результате реакции (6) составляет для энтальпии  $\Delta H_{\text{реак}} = -66$  кДж, для энергии Гиббса  $\Delta G_{\text{реак}} = -150,48$  кДж, энтропии  $\Delta S_{\text{реак}} = 224,06$  Дж/(моль·К).

Таким образом, рассматриваемая реакцию (6) термодинамически возможна ( $\Delta G = -150,48$  кДж), экзотермична ( $\Delta H_{\text{реак}} = -66$  кДж) и сопровождается значительным увеличением энтропии ( $\Delta S_{\text{реак}} = 224,06$  Дж/(моль·К) вследствие выделения газа ( $\text{NH}_3$ ).



Таблица 3. Свойства соединений [5]

| Свойства                                                                | Ca(OH) <sub>2</sub> ,<br>портландит | (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO,<br>карбамид | CaCO <sub>3</sub> ,<br>карбонат<br>кальция | NH <sub>3</sub> ,<br>аммиак |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|
| Молярная масса,<br>г                                                    | 74,08                               | 60,05                                           | 100,09                                     | 17,03                       |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                            | 2,24                                | 1,33                                            | 2,73                                       | 0,771<br>г/л                |
| Растворимость (в<br>100 г воды)                                         | 0,16                                | 104,7                                           | 0                                          | 52,6                        |
| S <sup>0</sup> , стандартная<br>молярная<br>энтропия,<br>Дж/(моль·К)    | 76,1                                | 173,04                                          | 88,7                                       | 192,6                       |
| ΔH <sup>0</sup> , стандартная<br>молярная<br>энтальпия,<br>Дж/моль      | -986,6                              | -319,2                                          | 1207,0                                     | -46,1                       |
| ΔG <sup>0</sup> , стандартная<br>молярная<br>энергия Гиббса,<br>Дж/моль | -806,8                              | -203,84                                         | -1127,7                                    | -16,71                      |

Рассмотрим изменение объема твердой фазы системы. Молярная масса Ca(OH)<sub>2</sub> равна 74,8 г, плотность составляет 2,24 г/см<sup>3</sup>, то есть молярный объем равен 33,07 см<sup>3</sup>. Молярная масса образующегося CaCO<sub>3</sub> равна 100,09 г, плотность составляет 2,71 г/см<sup>3</sup>, то есть молярный объем составляет 36,93 см<sup>3</sup>. Карбамид находится в растворе. NH<sub>3</sub> выделяется в виде газа. В результате реакции (2) объем твердой фазы в расчете на 1 моль Ca(OH)<sub>2</sub> уменьшается на 3,86 см<sup>3</sup>, то есть на 11,7 %. Это может привести к появлению внутренних напряжений сжатия на поверхности пор, т. е. происходит своего рода «подпрессовка», что приводит к увеличению прочности цементного камня

#### Выводы

Таким образом, карбамид-содержащие добавки приводят к существенному повышению прочности цементной матрицы искусственных цементных конгломератов. В результате взаимодействия портландита с карбамидом объем твердой фазы в расчете на 1 моль Ca(OH)<sub>2</sub> уменьшается на 11,7 %.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 11.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 11.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.

Это может привести к появлению внутренних напряжений сжатия на поверхности пор, т. е. происходит своего рода «подпрессовка», что приводит к увеличению прочности цементной матрицы.

#### Библиографический список

1. Добавки в бетон. Справочное пособие / В.С. Рамачандран [и др.] Под ред. В.С. Рамачандрана. Перевод с англ. Т.И. Розенберг и С.А. Болдырева. Под ред. А.С. Болдырева и В.Б. Ратинова. - М.: Стройиздат, 1988. - 575 с.
2. Журавлев, В. А. Химическая добавка к бетонам на основе карбамида / В. А. Журавлев, Т. В. Мурашкина, Н. В. Гилязидинова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 6(51). – С. 88-89. – EDN PXYUYD.
3. Термодесорбционное масс-спектрометрическое исследование процессов разложения карбамида в бетоне / А. В. Ульянов, И. С. Гончарова, А. К. Буряк [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 121-128. – EDN SCCBKV.
4. Строительные материалы: учеб. для вузов по строит. спец. / В.Г. Микульский, В.Н. Куприянов, Г.П. Сахаров [и др.]; Под общ. ред. В.Г. Микульского. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: Изд-во АСВ, 2000. - 534 с.
5. Краткий химический справочник / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. - Л. – Химия. 1978. - 392 стр.
6. Основы строительной химии : учебное пособие для бакалавриата по направлению 270800 "Строительство" / Г. И. Бердов, В. Н. Зырянова, Э. А. Кучерова [и др.] ; Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2014. – 168 с. – ISBN 978-5-7513-1941-0. – EDN TOKKNX.
7. Межфазное взаимодействие и механическая прочность композиционных вяжущих материалов часть 2. Цементные материалы / Г. И. Бердов, В. Н. Зырянова, Л. В. Ильина [и др.] // Техника и технология силикатов. – 2014. – Т. 21, № 4. – С. 2-8. – EDN TBJBUT.



Научная статья

УДК 691.32 : 666.972

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_62

## ВЛИЯНИЕ ОКСИДА И ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА И КАМНЯ

© Авторы 2023

SPIN-код: 4265-7935

AuthorID: 331336

ORCID 0000-0002-8520-4453

ResearcherID: AAB-3899-2021

Scopus ID: 57076182100

**ИЛЬИНА Лилия Владимировна**

доктор технических наук, профессор

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Новосибирск, e-mail: nsklika@mail.ru)*

SPIN-код: 4888-2644

AuthorID: 702512

Scopus ID: 6602628852

**БЕРДОВ Геннадий Ильич**

доктор технических наук, профессор

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Новосибирск, e-mail: stf@sibstrinl.ru)*

SPIN-код: 1881-7978

AuthorID: 977417

ORCID 0009-0005-7542-2931

ResearcherID:

Scopus ID: 57205662535

**ТУЛЯГАНОВ Александр Константинович**

доцент кафедры строительных материалов, стандартизации и сертификации

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Новосибирск, e-mail: klinker@bk.ru)*

SPIN-код: 6037-7438

AuthorID: 473125

ORCID 0000-0002-4288-2115

ResearcherID: K-8568-2014

Scopus ID: 6508381737

**ЧЕРНЫХ Тамара Николаевна**

доктор технических наук, профессор

*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет (Россия, Челябинск))*

**Аннотация.** В статье приведены результаты по влиянию количества оксида и гидроксида алюминия на водопотребность цемента, на процесс схватывания цементного теста, на кинетику набора прочности и прочность при сжатии цементного камня. В результате анализа экспериментальных данных сделан вывод, что добавка гидроксида алюминия является эффективной добавкой - ускорителем схватывания портландцемента и повышает прочность цементного камня во все исследуемые сроки твердения. Оптимальная ее дозировка с точки зрения сокращения сроков схватывания и обеспечения наибольшего упрочнения является количество 1 мас. %. При таком количестве добавки сроки схватывания сокращаются: на 47 % - начало схватывания, на 30 % - конец схватывания, прочность при сжатии цементного камня при этом увеличивается в 2,1 раза.

**Ключевые слова:** портландцемент; цементный камень; процесс схватывания; прочность при сжатии; гидротеленит; строительные материалы

**Для цитирования:** Влияние оксида и гидроксида алюминия на свойства цементного теста и камня / Л.В. Ильина, Г.И. Бердов, А.К. Туляганов, Т.Н. Черных // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 62-67. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_62



Original article

## INFLUENCE OF ALUMINUM OXIDE AND HYDROXIDE ON THE PROPERTIES OF CEMENT DOUGH AND STONE

© The Author(s) 2023

**ILINA Liliia Vladimirovna**

doctor of technical sciences, professor

*Novosibirsk state University of architecture and civil engineering  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: nsklika@mail.ru)*

**BERDOV Gennadii Ilich**

doctor of technical sciences, professor Novosibirsk state University of  
architecture and civil engineering

*Novosibirsk state University of architecture and civil engineering  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: stf@sibstrinl.ru)*

**TULIAGANOV Vladimir Viktorovich**

Associate Professor of the Department of Building Materials,  
Standardization and Certification

*Novosibirsk state University of architecture and civil engineering  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: molodin@sibstrin.ru)*

**CHERNYKH Tamara Nikolaevna**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*South Ural State University (National Research University  
(Russia, Chelyabinsk))*

**Abstract.** The article presents the results on the effect of the amount of aluminum oxide and hydroxide on the water demand of cement, on the setting process of cement dough, and on the kinetics of strength gain and compressive strength of cement stone. As a result of the analysis of experimental data, it was concluded that the addition of aluminum hydroxide is an effective additive - accelerator for setting Portland cement and increases the strength of cement stone during all the studied hardening periods. Its optimal dosage in terms of shortening the setting time and ensuring the greatest hardening is 1%. With such an amount of additives, the setting time is reduced: by 47% at the beginning of setting and by 30% at the end of setting, the compressive strength of cement stone increases 2.1 times.

**Keywords:** portland cement; cement stone; setting process; compressive strength; hydrogelenite; building materials

**For citation:** The influence of aluminum oxide and hydroxide on the properties of cement dough and stone / L.V. Ilyina, G.I. Berdov, A.K. Tulyaganov, T.N. Chernykh // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 62-67. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_62

### Введение

Цементные композиты в настоящее время являются важнейшими конструкционными материалами. Увеличивающиеся темпы монолитного и сборно-монолитного строительства и реконструкция старого жилого фонда требует применения современных эффективных строительных материалов [1-4]. В связи с этим ведущим направлением развития технологии цементных бетонов является использование потенциальных возможностей цемента в полной мере, сокращение времени на выполнение отдельных технологических операций и упрочнение искусственного композита в начальный период твердения.

При этом первостепенными задачами

выступают: сокращение сроков схватывания и интенсификация процессов образования кристаллогидратов как при твердении в стандартных условиях, так и при тепловлажностной обработке (ТВО). При изготовлении цементных композитов в заводских условиях возможно сократить период предварительной выдержки изделий перед ТВО и саму продолжительность ТВО путем введения добавок ускорителей. Это в свою очередь ускоряет оборачиваемость форм и камер ТВО, снижает металлоемкость и энергозатраты. Введение добавок ускорителей позволяет интенсифицировать процесс образования кристаллогидратов и тем самым сократить расход портландцемента. Дополнительное введение эффективных добавок пластифицирующего действия и электролитов



позволяет сокращать расход цемента в еще большей мере [5-7].

При монолитном строительстве особенно при отрицательной температуре использование добавок-ускорителей является еще более значимым, так как данные добавки позволяют формировать композит мелкопористой структуры с большим количеством пор размером менее 50 нм с необходимой прочностью достаточной для его сопротивляемости давлению замерзающей в порах воды. Кроме того, вода в порах малого диаметра находится в пленочном состоянии и замерзает при очень низких температурах [8]. В этой связи контроль над процессом образования кристаллогидратов является актуальным. Контролирование кинетики твердения цементных композитов может привести к сокращению расхода вяжущего, снижению металлоемкости и энергозатрат при производстве бетонных и железобетонных изделий [9-12].

Основными показателями эффективности добавок-ускорителей схватывания цементных композиций является сокращение сроков схватывания более чем на 25 % при твердении в нормальных условиях и увеличение при этом прочности композита не менее чем на 20 % в начальный период твердения (1 суток) [13-14].

Среди эффективных добавок-ускорителей схватывания и твердения цементных смесей, в том числе подходящих для использования в составе сухих строительных смесей (ССС), могут быть выделены ускорители нового поколения на основе активных оксидов и гидроксидов алюминия.

Цель данной работы – анализ влияния количества оксида и гидроксида алюминия на свойства цементного теста и цементного камня, изготовленного из портландцемента, содержащего добавку доменного гранулированного шлака в количестве 25-30 %.

## Материалы и методы исследований

Влияние добавок на процесс схватывания изучалось на тесте нормальной густоты на приборе Вика по ГОСТ 310.3.

Прочностные характеристики цементного камня определялись по испытанию на сжатие образцов-кубиков с ребром 20 мм, изготовленных из цементного теста нормальной густоты и набравших прочность в течение 1, 3 и 28 суток в стандартных условиях (1 сутки – над водой и 27 суток в воде при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ).

Для качественной и количественной оценки фазового состава цементного камня при использовании добавок, ускоряющих схватывание цемента, применялся рентгенофазовый анализ, который выполнялся на порошковом рентгеновском дифрактометре D8 Advance (Bruker AXS, Германия). Расшифровка межплоскостных расстояний полученных эффектов производилась с помощью базы данных порошковых дифрактограмм ICDD PDF-4, выпуск 2011 г.

В данной работе использовался портландцемент ЦЕМ II/В-Ш 32,5Н АО «Искитимцемент» (НСО). Минералогический состав клинкера, мас. %:  $\text{C}_3\text{S}$  – 68,4;  $\text{C}_2\text{S}$  – 10,29;  $\text{C}_4\text{AF}$  – 11,95;  $\text{C}_3\text{A}$  – 6,07.

Количество гранулированного доменного шлака в цементе составляло 27,7 мас. %.

В качестве добавок в работе использованы оксид и гидроксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) производства АО «Микроинтек». Они предварительно растворялись в воде затворения и добавлялись в количестве 0,5; 1,0 и 1,5 % от массы цемента.

## Результаты и обсуждение

При увеличении количества вводимой в цемент добавки ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  или  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) водопотребность цемента для получения теста нормальной густоты монотонно увеличивается (табл. 1). Что может быть обусловлено адсорбцией и хемосорбцией воды на поверхности частиц вводимой добавки.

Таблица 1. Влияние количества оксида и гидроксида алюминия на водопотребность цемента (В/Ц, мас.%)

| Содержание добавки, мас. % | В/Ц, мас. % (водопотребность), при введении |                         |
|----------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
|                            | $\text{Al}(\text{OH})_3$                    | $\text{Al}_2\text{O}_3$ |
| 0                          | 26,6                                        | 26,6                    |
| 0,5                        | 26,7                                        | 26,6                    |
| 1,0                        | 27,5                                        | 27,3                    |
| 1,5                        | 27,7                                        | 27,6                    |

При введении исследуемых добавок сроки начала и конца схватывания теста сокращаются (табл. 2). При этом, влияние  $\text{Al}(\text{OH})_3$  проявляется сильнее, чем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Продолжительность начала схватывания при этом сокращается на 47 %, конца схватывания – на 30 %.

Таблица 2. Влияние количества оксида и гидроксида алюминия на сроки схватывания цементного теста

| Содержание добавки, % | Сроки схватывания цементного теста, мин, при введении |       |                         |       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|-------|-------------------------|-------|
|                       | $\text{Al}(\text{OH})_3$                              |       | $\text{Al}_2\text{O}_3$ |       |
|                       | начало                                                | конец | начало                  | конец |
| 0                     | 152                                                   | 299   | 152                     | 299   |
| 0,5                   | 122                                                   | 250   | 140                     | 280   |
| 1,0                   | 110                                                   | 235   | 116                     | 250   |
| 1,5                   | 80                                                    | 210   | 86                      | 226   |

Прочностные характеристики цементного камня во все исследуемые сроки твердения (1, 3, 28 суток) больше, чем у образцов без добавки (табл. 3). При этом, в возрасте 1, 3 и 28 суток прочность образцов при добавлении 0,5-1,5 мас. %  $\text{Al}(\text{OH})_3$  больше, чем при введении такого же количества  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и существенно больше, чем у образцов без добавок. Наибольшего упрочнения в 2,1 раза удалось достичь при введении 1 мас. % гидроксида алюминия.



Таблица 3. Влияние количества оксида и гидроксида алюминия на прочность при сжатии цементного камня

| Содержание добавки, % | Прочность при сжатии цементно-песчаного раствора, МПа, при введении |               |                |                                |               |                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|--------------------------------|---------------|----------------|
|                       | Al(OH) <sub>3</sub>                                                 |               |                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |               |                |
|                       | через 1 сутки                                                       | через 3 суток | через 28 суток | через 1 сутки                  | через 3 суток | через 28 суток |
| 0                     | 15,6                                                                | 38,7          | 71,9           | 15,6                           | 38,7          | 71,9           |
| 0,5                   | 19,4                                                                | 52,15         | 138,4          | 19,2                           | 45,8          | 72,3           |
| 1,0                   | 23,9                                                                | 62,45         | 152,2          | 22,4                           | 52,2          | 87,9           |
| 1,5                   | 21,5                                                                | 57,7          | 145,8          | 20,9                           | 50,4          | 80,4           |

Результаты рентгенофазового анализа гидратированного цемента, содержащих добавки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или Al(OH)<sub>3</sub> приведены на рис. 1-3 и в табл. 4. Дифрактограммы сняты после твердения камня в нормальных условиях в течение 28 суток.

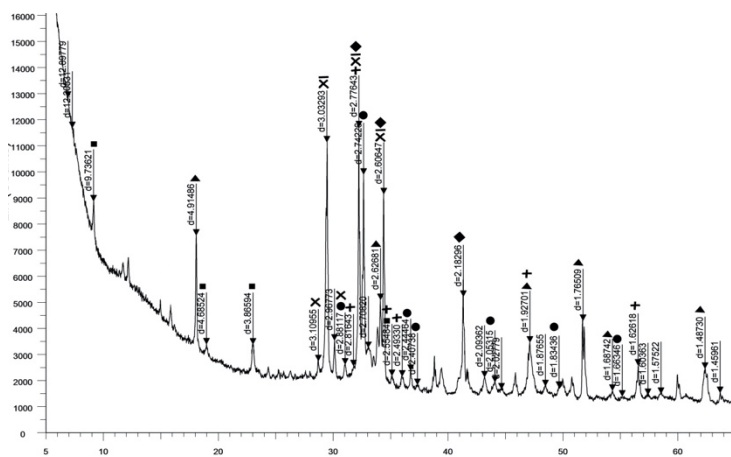


Рис. 1. Дифрактограмма образца контрольного состава (без добавок)

▲ - Ca(OH)<sub>2</sub>; ■ - 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O; ● - 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O; + - 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·19H<sub>2</sub>O; x - C-S-H; □ - 3CaO·SiO<sub>2</sub>; ◆ - β2CaO·SiO<sub>2</sub>

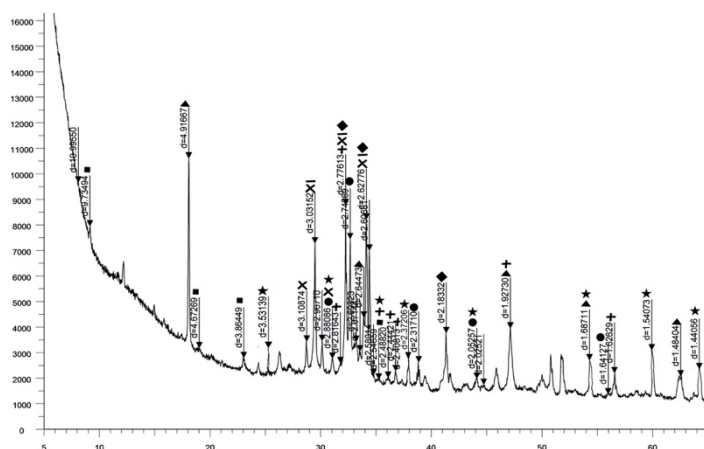


Рис. 2. Дифрактограмма цементного камня, содержащего 1 мас.% Al(OH)<sub>3</sub>

▲ - Ca(OH)<sub>2</sub>; ■ - 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O; ● - 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O; + - 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·19H<sub>2</sub>O; x - C-S-H; I -

3CaO·SiO<sub>2</sub>; ◆ - β2CaO·SiO<sub>2</sub>; \* - 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O

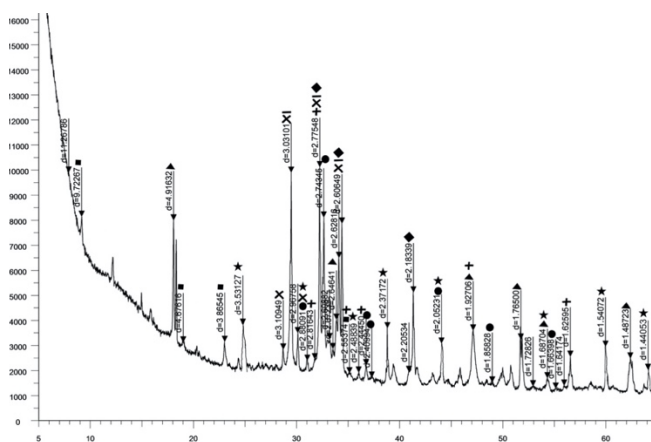


Рис. 3. Дифрактограмма цементного камня, содержащего 1 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

▲ - Ca(OH)<sub>2</sub>; ■ - 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O; ● - 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O; + - 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·19H<sub>2</sub>O; x - C-S-H; □ - 3CaO·SiO<sub>2</sub>; ◆ - β2CaO·SiO<sub>2</sub>; \* - 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O

В таблице 4 указаны размеры наиболее интенсивных рефлексов, приведенных на дифрактограммах соединений.

Таблица 4. Дифракционные характеристики продуктов гидратации

| Гидратная фаза                                                              | Межплоскостные расстояния, d/n, Å                        |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Ca(OH) <sub>2</sub>                                                         | 4,917; 2,628; 1,927; 1,796; 1,687; 1,484                 |
| 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3CaSO <sub>4</sub> ·32H <sub>2</sub> O | 9,735; 4,673; 3,864; 2,547                               |
| 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaSO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O  | 2,88; 2,73; 2,44; 2,41; 2,05; 1,83; 1,63                 |
| 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·19H <sub>2</sub> O                     | 2,881; 2,776; 2,54; 2,48; 1,92; 1,62                     |
| 2CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O    | 3,531; 2,881; 2,488; 2,372; 2,052; 1,687; 1,5407; 1,4405 |
| C-S-H                                                                       | 3,10; 3,02; 2,88; 2,77; 2,60                             |
| 3CaO·SiO <sub>2</sub>                                                       | 3,02; 2,77; 2,60                                         |
| β2CaO·SiO <sub>2</sub>                                                      | 2,77; 2,60; 2,18                                         |

Следует отметить, что интенсивность рефлексов алюминатов (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O, 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaSO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O, 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·19H<sub>2</sub>O) одинаковы, как для образцов без добавок, так и имеющих добавки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или Al(OH)<sub>3</sub>. Это позволяет сделать заключение о том, что введение указанных добавок не влияет на образование этих соединений. То есть Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al(OH)<sub>3</sub> не оказывают влияние на взаимодействие алюминатных фаз с водой в процессе гидратации цемента.

Иная ситуация с силикатными минералами



цемента. Содержание тоберморита C-S-H в затвердевших образцах уменьшается при введении  $Al_2O_3$  и  $Al(OH)_3$ . Очень характерно увеличение количества портландита  $Ca(OH)_2$  при введении этих добавок.

Характерно повышение содержания портландита  $Ca(OH)_2$  при введении добавки  $Al(OH)_3$ . Это, а также уменьшение величины рефлексов  $3CaO \cdot SiO_2$  и  $\beta-2CaO \cdot SiO_2$  свидетельствует о более глубокой гидратации цемента при введении  $Al_2O_3$  и особенно  $Al(OH)_3$ . Такой эффект может быть обусловлен тем, что указанные добавки взаимодействуют с силикатными фазами, то есть с  $2CaO \cdot SiO_2$ , образующимся при гидролизе  $3CaO \cdot SiO_2$  и содержащимся в исходном цементе, с образованием гидрогеленита ( $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$ ). Это подтверждается результатами рентгенофазового анализа.

Термодинамический анализ возможных реакций в процессе гидратации цемента приведен в табл. 5. Исходные данные использованы из монографии В.А. Киреева [14] и справочника Рабиновича В.А., Хавина З.Я. [15].

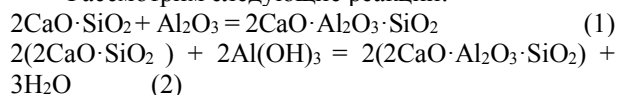
Таблица 5. Термодинамические свойства веществ при 298,15 К

| Соединение                                              | $\Delta H_{298}^0$ , ккал | $\Delta G_{298}^0$ , ккал | $\Delta S_{298}$ , кал/(моль·К) |
|---------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| $\gamma-Al_2O_3$                                        | -396,0                    | -373,79                   | 12,55                           |
| $Al(OH)_3$                                              | -304,2                    | -271,9                    | *                               |
| $H_2O$                                                  | -68,31                    | -56,70                    | 16,75                           |
| $2CaO \cdot SiO_2$                                      | -551,49                   | -524,0                    | 30,50                           |
| $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ геленит                | -952,9                    | -904,6                    | 47,40                           |
| $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ анортит                | -1009,54                  | -955,9                    | 48,40                           |
| $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ гексагональный анортит | -1004,65                  | -960,1                    | *                               |

\* - данные в [13] не указаны.

Из указанных в табл. 5 алюмосиликат кальция геленит имеет соотношение  $CaO$  и  $SiO_2$ , соответствующее белиту  $2CaO \cdot SiO_2$ .

Рассмотрим следующие реакции:



Для реакции (1):

- $\Delta H_{\text{реак}} = -5,41$  ккал = -22,6 кДж
- $\Delta G_{\text{реак}} = -6,81$  ккал = -28,5 кДж
- $\Delta S_{\text{реак}} = 4,35$  кал/(моль·К) = 18,20 Дж/(моль·К)

Для реакции (2):

- $\Delta H_{\text{реак}} = -194,42$  ккал = -813,45 кДж
- $\Delta G_{\text{реак}} = -259,02$  ккал = -1083,7 кДж

Расчеты показывают, что реакция (1) возможна и экзотермична. Реакция (2) также экзотермична, а значения  $\Delta H_{\text{реак}}$  и  $\Delta G_{\text{реак}}$  значительно превосходят данные по реакции (1). То есть реакция (2) предпочтительнее.

Таким образом, введение алюминий-

содержащих добавок обуславливает ускорение процесса схватывания цементного теста и упрочнение цементного камня, особенно при добавлении  $Al(OH)_3$ , так реакция (2) же предпочтительнее.

Протекание реакции (2) наиболее вероятно при взаимодействии  $Al(OH)_3$  с  $2CaO \cdot SiO_2$ , выделяющемся в результате гидролиза  $3CaO \cdot SiO_2$ . Об этом свидетельствует увеличение содержания  $Ca(OH)_2$  в цементном камне. Такое связывание  $2CaO \cdot SiO_2$  приводит к повышению скорости реакции (2), то есть и к сокращению сроков схватывания цементного теста.

#### Заключение

Таким образом, оксид и гидроксид алюминия, особенно гидроксид алюминия, могут применяться как эффективные добавки-ускорители схватывания и твердения цементных композиций и добавки-упрочнители искусственных композитов на цементной основе. Для максимального сокращения процесса схватывания и наибольшего упрочнения цементных систем оптимальное количество добавки составляет 1 мас. %. При добавлении 1 мас. %  $Al(OH)_3$  можно получить следующие результаты:

- начало схватывания сокращается на 47 %, конец схватывания - на 30 %,
- прочность при сжатии цементного камня, твердевшего 28 суток в стандартных условиях увеличивается в 2,1 раза.

#### Библиографический список

1. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Р. Добавки в бетон. - М.: Стройиздат, 1988. - 575 с.
2. Diamond S., Sahu S., Thaulow N. Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete // Cem. Concr. Res. 2004.- V. 34.- P. 1625-1632.
3. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62) С. 3-12. DOI: 10.5862/MCE.62.1.
4. Ponomarev A., Knezević M., Vatin N., et. al. Nanosize scale additives mix influence on the properties of the high performance concretes // Journal of Applied Engineering Science. 2014. № 12(3). Pp. 227-231. DOI: 10.5937/jaes12-6161.
5. Добавки ускорители схватывания цемента. URL: [http://baurum.ru/\\_library/?cat=additives\\_adjusting\\_firm&id=322](http://baurum.ru/_library/?cat=additives_adjusting_firm&id=322) (дата обращения: 20.07.2023). – Текст : электронный.
6. Ильина Л.В., Корховая Л.В. Повышение прочности цементной матрицы смеси для 3D-печати путем введения электролитов // В сборнике: СТРОЙСИБ - 2020. Эффективные материалы и технологии для транспортного и сельскохозяйственного строительства. Сборник научных трудов по материалам национальной Научно-технической конференции с международным участием. Новосибирский государственный аграрный университет. 2020. С.





101-105.

7. Усов Б. А. Химические добавки в технологии сборного железобетона / Б.А. Усов, Г. Э. Оскольникова // Строительство и архитектура. - 2015. - №4 -С. 7-14.

8. Fediuk R., Smoliakov A., Stoyushko N. Increase in composite binder activity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. (156). 012042. DOI:10.1088/1757-899X/156/1/012042.

9. Il'ina L., Mukhina I., Teplov A. Dry building mixture with complex dispersed mineral additives. AIP Conference Proceedings. 2016. 1698 (1). 070001. DOI:10.1063/1.4937871.

10. Il'ina L., Rudyak V., Khakimullina S. High-performance concretes with modifying micro additives of microsilica and diopside. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 456(1). 012045. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012045.

11. Akhverdiyeva T.A., Dzhfarov R. Vlijanie tonkomolotyh mineral'nyh dobavok na svojstva betona

[Impact of Fine Ground Mineral Additives on Properties of Concrete]. Stroitel'nye Materialy [Buildind materials]. 2019. No. 3 (768). Pp. 73–76. DOI:10.31659/0585-430x-2019-768-3-73-76. (rus).

12. Илясов А. Г., Медведева И.Н., Корнеев В.И. Ускорители схватывания и твердения портландцемента на основе оксидов и гидроксидов алюминия // Металлург. 2008. № 12. С. 73-77.

13. Сари М., Лекселент Дж. Регулирование процессов схватывания и твердения минеральных вяжущих / 4-я международная конференция «Современные технологии сухих смесей в строительстве» Mix-Build - СПб, 3-5 декабря 2002. - С. 103.

14. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. Изд. 2, испр. и доп. - М.: Химия. 1975. 536 с.

15. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Изд. 2-е, испр. и доп. Л. – Химия. 1978. 392 стр.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 11.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 11.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья  
УДК 691.327 : 666  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_68

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАРКАСНЫХ МЕТАЛЛОБЕТОНОВ

© Авторы, 2023

**КАЗАКОВ Руслан Евгеньевич**

студент

*Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет им. Н. П. Огарева  
(Россия, Саранск)*

**ЗЮЗИН Дмитрий Алексеевич**

соискатель

*Научно-исследовательский институт строительной физики  
РААСН  
(Россия, Москва)*

SPIN: 2877-0785

ORCID 0000-0001-7976-9792

ScopusID: 57214232767

**АФОНИН Виктор Васильевич**

кандидат технических наук, доцент

*Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет им. Н. П. Огарева  
(Россия, Саранск, e-mail: vvafonin53@yandex.ru)*

SPIN: 4425-5045

ORCID 0000-0001-8407-8144

ScopusID: 56662851300

**ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович**

академик РААСН, доктор технических наук, профессор

*Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет; Научно-  
исследовательский институт строительной физики РААСН  
(Россия, Москва, e-mail: yerofeevvt@mail.ru)*

**Аннотация.** Показана эффективность применения в строительной отрасли композиционных материалов с высокой прочностью. К ним относятся полимербетоны, порошково-активированные и другие виды композитов на неорганических и органических связующих. Однако процесс создания новых видов бетонов активно продолжается. В частности, это относится к таким, которые предназначаются для работы в условиях воздействия высоких температур, динамических нагрузок и ионизирующего излучения. В данном аспекте перспективными представляются композиты на металлических связующих – металлобетоны (метоны). В данной статье рассматриваются каркасные металлобетоны, получаемые в два этапа. На первом этапе крупные заполнители склеиваются по форме будущего изделия в каркас. На втором же этапе осуществляется пропитка пустот пористого каркаса матричной составляющей. Для каркаса применяются как металлические, так и другие виды термостойких клеев, а для матрицы – наполненные или ненаполненные металлические связующие. Приводятся расходы вяжущих на основе жидкого стекла для изготовления каркасов на фарфоровых и базальтовых заполнителях, керамзите. Показана достаточно высокая прочность каркасов, требуемая для обеспечения технологических приемов по созданию металлобетонов. Приведены упруго-прочностные свойства каркасных металлобетонов на различных заполнителях и алюминиевого связующего. Прочность металлобетонов при сжатии составляет 180–200 МПа, при изгибе – 7,9–8,5 МПа, модуль упругости – 6300–6500 МПа. Рассмотрена методика определения однородности исследуемых бетонов на основе аппроксимации экспериментальных свойств с помощью уравнения прямой линии.

**Ключевые слова:** композиционные материалы; каркасная структура; каркасы; металлические матрицы; каркасные металлобетоны; прочность; модуль упругости; аппроксимация прямой линией; строительные материалы

**Для цитирования:** Исследование каркасных металлобетонов / Р.Е. Казаков, Д.А. Зюзин, В.В. Афонин, В.Т. Ерофеев // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 68-75. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_68



Original article

## THE RESEARCH OF FRAME METAL CONCRETE

© The Author(s) 2023

**KAZAKOV Ruslan Yevgenyevich**

Student

*National Research Mordovian Ogarev State University  
(Russia, Saransk)*

**ZYUZIN Dmitry Alekseevich**

Applicant

*Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of  
Architecture and Building Sciences  
(Russia, Moscow)*

**AFONIN Viktor Vasilyevich**

Candidate of Technical Sciences, associate professor

*National Research Mordovian Ogarev State University  
(Russia, Saransk, e-mail: vvafonin53@yandex.ru)*

**EROFEEV Vladimir Trofimovich**

Academician of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor

*Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of  
Architecture and Building Sciences; National Research Moscow State  
University of Civil Engineering  
(Russia, Moscow, e-mail: erofeevvt@bk.ru)*

**Abstract.** The article shows the effectiveness of using composite materials with high strength in the construction industry. These include polymer concretes, powder-activated and other types of composites based on inorganic and organic binders. However, the process of creating new types of concrete is actively continuing. In particular, this applies to those designed to operate under conditions of exposure to high temperatures, dynamic loads and ionizing radiation. In this aspect, composites based on metal binders — metal concrete (metones) are promising. This article discusses frame-metal concrete obtained in two stages. At the first stage, large fillers are glued together according to the shape of the future product into a frame. At the second stage, the voids of the porous frame of the matrix component are impregnated. Both metal and other types of heat-resistant adhesives are used for the frame, and filled, or unfilled metal binders are used for the matrix. The costs of binders based on liquid glass for the manufacture of frames on porcelain and basalt fillers, and expanded clay are given. The sufficiently high strength of the frames required to provide technological techniques for the creation of metal concrete is shown. The elastic-strength properties of frame metal concrete on various fillers and aluminum binder are given. The compressive strength of metal concrete is 180–200 MPa, the bending strength is 7.9–8.5 MPa, and the modulus of elasticity is 6300–6500 MPa. A technique for determining the homogeneity of the studied concretes based on the approximation of experimental properties using the equation of a straight line is considered.

**Keywords:** composite materials; frame structure; frames; metal matrices; frame metal concrete; strength; modulus of elasticity; approximation by a straight line; building materials

**For citation:** The Research of frame metal concrete / R.E. Kazakov, D.A. Zyuzin, V.V. Afonin, V.T. Erofeev // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 68-75. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_68

### *Введение.*

В современном строительстве бетоны являются основными конструкционными материалами. В настоящее время мировой объем их применения составляет более 2 млрд. м<sup>3</sup> в год. Последние десятилетия ознаменовались значительными достижениями в технологии бетона. Появились новые композиционные и другие эффективные вяжущие, активные минеральные добавки и наполнители, армирующие волокна,

технологические приемы и методы производства композиционных строительных материалов. Это позволило не только создать новые виды бетонов и освоить технологии их производства, но и значительно расширить номенклатуру применяемых в строительстве подобных материалов: от суперлегких теплоизоляционных до высокопрочных конструкционных [1].

Ныне существует более тысячи различных видов высокопрочных и сверхвысокопрочных



бетонов, включая нанобетоны, реакционные, порошково-активированные и другие виды бетонов [2-6]. Процесс создания новых видов бетонов интенсивно продолжается. Это касается в первую очередь материалов, применяемых в конструкциях, работающих в условиях воздействия повышенных статических и динамических нагрузок, высоких температур, ионизирующего излучения.

Быстрое развитие ряда отраслей промышленности способствовало возникновению некоторых неотложных проблем, связанных с изучением поведения традиционных материалов в ранее не встречавшихся условиях и с разработкой специальных материалов со свойствами, более полно отвечающими предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям.

За последние годы возросло количество научно-технической информации о металлических композиционных материалах. В публикуемых работах имеются необходимые сведения об их природе, рассмотрены физико-химические аспекты поверхностей раздела, изложены особенности структуры и описаны технологические способы их получения [7-9]. Приводятся сведения, характеризующие способность композитов работать в тяжелых условиях, однако использование дорогостоящих наполнителей и армирующих элементов, а также сложность технологии получения ограничивают их применение.

Повышение физико-механических показателей высоконаполненных композитов связано с формированием их оптимальной структуры. Необходимым признаком последней является наличие пространственного каркаса из частиц наполнителя и пленочной фазы связующего [10]. Однако в реальном композите некоторые зерна наполнителя, принадлежащие каркасу, находятся в прямом соприкосновении. Данное явление может быть устранено за счет применения каркасной технологии [10].

Перспективным направлением представляется получение и внедрение эффективных и доступных строительных композитов на металлических связующих и гранулированных заполнителях – металлобетонов (метононов), обладающих нужными механическими, эксплуатационными и экономическими характеристиками. Основы технологии получения подобных бетонов заложены В. И. Соломатовым, Ю. Б. Потаповым, Г. А. Лаптевым [11-16].

Данная статья посвящена научному обоснованию приемов и методов технологии получения каркасных композиционных материалов на металлических связующих и гранулированных заполнителях. Технология изготовления каркасных металлобетонов состоит в формировании каркаса по форме изделия путем склеивания зерен крупного заполнителя друг с другом термостойким связующим на первом этапе и в пропитке пустот расплавами металлов – на втором этапе [17]. Важнейшими характеристиками данной технологии являются оптимальное соотношение связующего и заполнителей, режимы уплотнения и отверждения

каркаса, реологические параметры расплавов и режимы пропитки каркаса и отверждения изделий [18].

Важнейшей характеристикой зернистой структуры является размер зерен. Принимая во внимание, что последний не влияет на объем межзерновой пористости, предпочтительно использовать материал с зернами малого размера. Это обусловлено следующим тем, что при малом размере зерен увеличивается число межзерновых пустот, а размер каждой из пор и каналов, соединяющих их, резко уменьшается.

Объем межзерновой пористости (пустотности) каркаса зависит от гранулометрического состава и формы зерен. Чем однороднее по размеру зерна, тем выше пористость. Полифракционные составы характеризуются более плотной упаковкой, в результате чего пустотность уменьшается. Непрерывная гранулометрия зерен повышает пустотность, а прерывистая – существенно ее понижает. Наибольшую пустотность при этом дают зерна сферической формы.

Формирование структуры каркаса является совокупностью процессов совмещения связующего с заполнителем, обволакивания последним зерен заполнителя, формования и отверждения. В каркасной смеси для каждой пары «связующее – заполнитель» должно соблюдаться их оптимальное соотношение. Клея в смеси должно быть ровно столько, чтобы качественно склеить между собой зерна заполнителя и сформировать пористую структуру каркаса. При содержании связующего свыше оптимального количества излишки клея стекают с заполнителей в нижнюю часть формы. Если же содержание клея недостаточно, то не достигается качественного обволакивания им зерен крупного заполнителя и, как результат, соединение в межзерновых контактах становится неудовлетворительным. Специфика технологии изготовления каркасных металлобетонов, связанная с высокими температурами, требует применения для склеивания зерен термостойких клеевых составов. Это связано с тем, что при заполнении каркаса горячим расплавом металла возникает термический удар. А это, в свою очередь, может повлечь возникновение больших напряжений и разрушение клеевой прослойки.

### *Цель и задачи исследований*

Цель исследований состояла в установлении упруго-прочностных свойств металлобетонов.

Задачи исследований.

1. Выявление расходов на приготовление клея каркасов на жидкостекольном связующем.
2. Установление упруго-прочностных характеристик бетонов на металлических связующих и заполнителях различной природы.
3. Установление числовых оценок (метрик) однородности средних арифметических характеристик исследуемых каркасных металлобетонов с заполнителями различной природы.

### Материалы и методы

При исследовании рассматривались металлобетоны на каркасах с вяжущими на основе жидкого стекла и матрицах на алюминиевых связующих. В процессе изготовления образцов каркасную смесь на жидком стекле уплотняли вибрированием с частотой 550 колебаний в минуту и амплитудой 0,4 мм при продолжительности 8–10 с. Отверждение образцов осуществлялось сначала в нормальных температурно-влажностных условиях, а затем с применением обогрева. В дальнейшем для ускорения отверждения жидкого стекла использовали термическую обработку, которая одновременно являлась технологической операцией перед заливкой расплавленного металла. В качестве заполнителей использовались фарфоровые шарики, базальтовый щебень и керамзит крупностью 5–10 мм. Для числовой оценки однородности материалов использован математический аппарат аппроксимации экспериментальных функций.

### Результаты исследований и их обсуждение

Оптимизация составов композитов, в том числе каркасных смесей, связана с поиском экстремума на кривой «свойства – состав». В каркасных смесях качество клеевого соединения будет определяться адгезией клеевой композиции к поверхности зерен, матрицы к поверхности каркаса из склеенных зерен, как было показано в данной работе.

На рис. 1 показан количественное содержание клея и заполнителей оптимального расхода составов каркасных смесей, где

I – каркасная смесь с фарфоровыми шариками,

II – каркасная смесь с базальтовым щебнем,

III – каркасная смесь с керамзитом.

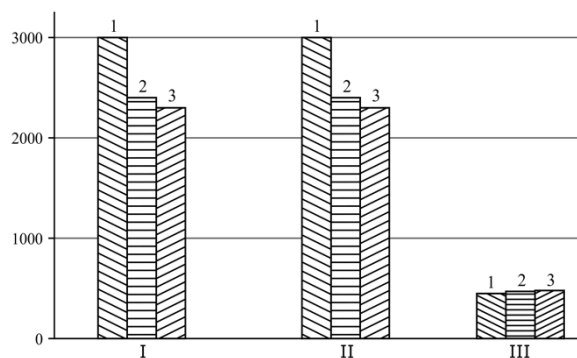


Рис. 1. Количественный расход заполнителей на 100 мас. ч. жидкостекольной композиции с различными добавками;  
1 – без добавки, 2 – с 10% добавкой портландцемента, 3 – с 10% добавкой оксида кальция

Из результатов испытаний следует, что расход связующего для формирования соответствующего каркаса определяется его реологическими характеристиками, а также поверхностной пористостью заполнителей. При снижении вязкости

связующего его расход уменьшается, и заполнители покрываются более тонкой пленкой. При этом формируется лучшая пористая структура для качественной пропитки. В среднем толщина пленки связующего на поверхности заполнителя составляла 0,10–0,12 мм.

Упругие свойства клеевого слоя на зернах заполнителя являются важным структурным параметром, с помощью которого можно регулировать интенсивность напряжений, возникающих при усадке металла матрицы и внешней нагрузке в структурных элементах каркасного композита [15].

При исследовании влияния вида и крупности заполнителя на прочность образцов каркаса проводились испытания кубиков с размером ребра 10 см. Связующим выступало жидкое стекло в сочетании с активной добавкой, в качестве которой использовали портландцемент (10 мас. ч. на 100 мас. ч. вяжущего). Результаты исследования показали падение прочности образцов при увеличении размера фарфоровых шариков. Очевидно, что это объясняется уменьшением площади контактирующей поверхности в общей структуре материала. Испытания также показали, что каркасы имеют прочностные свойства достаточные для проведения технологических операций по изготовлению металлобетонов.

Далее были изготовлены образцы из металлобетона каркасного типа на алюминиевой матрице. Предварительно жидким стеклом с добавкой портландцемента были склеены заполнители в каркас по форме будущих изделий. После сушки и прогрева пустоты каркасов пропитывали матрицей из алюминиевого сплава марки АЛ2.

Результаты испытаний по выявлению предела прочности при сжатии при изгибе и модуля упругости при сжатии представлены в табл. 1.

Из полученных результатов следует: – прочность и другие свойства каркасных металлобетонов определяются свойствами единичных зерен, клея каркаса и матрицы; – каркасные металлобетоны обладают достаточно высокими прочностными показателями; – использование каркасной технологии позволяет получать материалы с более однородным составом по сечению образцов, что важно, например, при создании радиационно-защитных изделий.



Таблица 1. Прочностные свойства каркасных бетонов на алюминиевой матрице в зависимости от вида и крупности заполнителя [11]

| Вид заполнителя и его крупность       | Предел прочности при сжатии, МПа | Предел прочности при изгибе, МПа | Модуль упругости при сжатии, МПа |
|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Щебень диабазовый фракции 7–10 мм  | 188                              | 7,9                              | 65 000                           |
| 2. Щебень диабазовый фракции 5–7 мм   | 191                              | 8,0                              | 66 400                           |
| 3. Щебень базальтовый фракции 7–10 мм | 179                              | 7,9                              | 63 800                           |
| 4. Щебень базальтовый фракции 5–7 мм  | 184                              | 8,1                              | 64 300                           |
| 5. Фарфоровые шарики диаметром 10 мм  | 192                              | 7,9                              | 65 100                           |
| 6. Фарфоровые шарики диаметром 6 мм   | 194                              | 8,5                              | 65 300                           |

Приведенные в табл. 1 данные используем для определения максимальных, средних и среднеквадратических ошибок аппроксимации уравнением прямой линии [19]. Прямая линия принята на основании полученной однородности составов. Формулы ошибок приняты из [19]. Они имеют следующий вид:

а) максимальная ошибка аппроксимации

$$E_{\infty}(f) = \max_{1 \leq k \leq N} \{f(x_k) - y_k\}; \quad (1)$$

б) средняя ошибка аппроксимации

$$E_1(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f(x_k) - y_k|, \quad (2)$$

и) средняя квадратическая ошибка аппроксимации

$$E_2(f) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [f(x_k) - y_k]^2}, \quad (3)$$

Где  $N$  – количество опытов (здесь количество составов),

$f(x_k)$  – значения функции аппроксимации (здесь прямой линии),

$y_k$  – данные эксперимента (прочность при сжатии, прочность при изгибе, модуль упругости при сжатии) в соответствии с табл. 1.

Предлагается аппроксимацию данных сначала выполнить для абсолютных значений, как в табл. 1, а потом для приведенных значений, приведенных к

максимуму соответствующего свойства рассматриваемых составов.

Расчетные значения результатов аппроксимации экспериментальных данных табл. 1 приведены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2. Ошибки аппроксимации данных прямой линией в абсолютных величинах

| Свойство                    | Максимальная ошибка, МПа | Средняя ошибка, МПа | Среднеквадратическая ошибка, МПа |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Предел прочности при сжатии | 1,714286                 | 1,123810            | 1,249762                         |
| Предел прочности при изгибе | 0,185714                 | 0,102857            | 0,115057                         |
| Модуль упругости при сжатии | 373,333333               | 173,333333          | 218,072363                       |

Как видно из табл. 2, ошибки имеют прямую зависимость от максимальных значений соответствующих свойств материалов.

Таблица 3. Ошибки аппроксимации данных прямой линией в относительных единицах

| Свойство                    | Максимальная ошибка, отн. ед. | Средняя ошибка, отн. ед. | Среднеквадратическая ошибка, отн. ед. |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Предел прочности при сжатии | 0,008837                      | 0,005793                 | 0,006442                              |
| Предел прочности при изгибе | 0,021849                      | 0,012101                 | 0,013536                              |
| Модуль упругости при сжатии | 0,005622                      | 0,002610                 | 0,003284                              |

Расчет относительных ошибок аппроксимации позволяет сравнивать их для различных показателей свойств материалов. При этом следует отметить, что характер графических построений свойств относительно числа опытов (номера заполнителя) практически остается неизменным, за исключением разметки по оси ординат, как это показано на рис. 2–7.

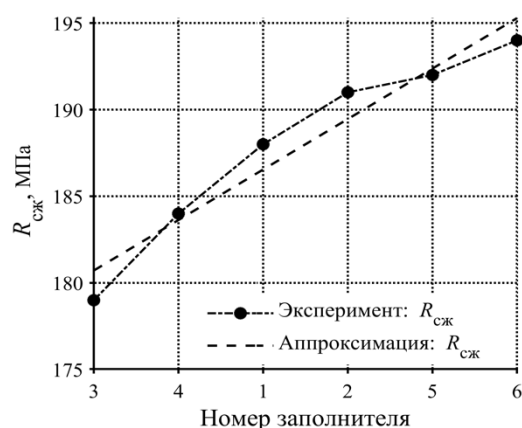


Рис. 2. Сравнение данных эксперимента свойства предела прочности при сжатии с аппроксимацией прямой линией в абсолютных значениях (МПа)

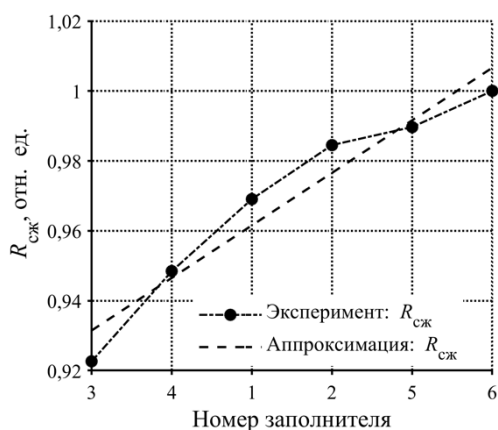


Рис. 3. Сравнение данных эксперимента свойства предела прочности при сжатии с аппроксимацией прямой линией в относительных единицах (отн. ед.)

На рис. 2, рис. 3 и последующих разметка «Номер заполнителя» по оси абсцисс означает номер заполнителя или вид заполнителя и его крупность, как это отмечено в табл. 3.

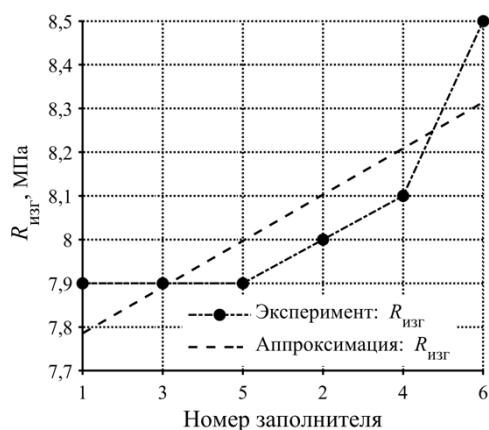


Рис. 4. Сравнение данных эксперимента свойства предела прочности при изгибе с аппроксимацией прямой линией в абсолютных значениях (МПа)

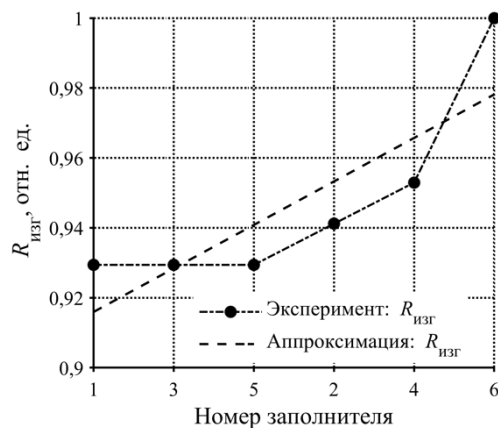


Рис. 5. Сравнение данных эксперимента свойства предела прочности при изгибе с аппроксимацией прямой линией в относительных единицах (отн. ед.)

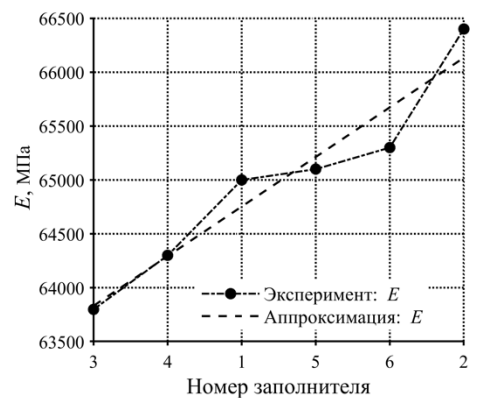


Рис. 6. Сравнение данных эксперимента свойства модуля упругости при сжатии с аппроксимацией прямой линией в абсолютных значениях (МПа)

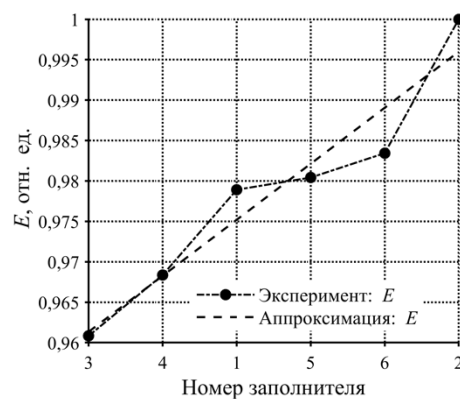


Рис. 7. Сравнение данных эксперимента свойства модуля упругости при сжатии с аппроксимацией прямой линией в относительных единицах (отн. ед.)

Таким образом, при проведении описанных исследований, можно находить числовые оценки однородности свойств соответствующих материалов, как это было показано в данной работе на основе данных проведенных экспериментов.





### Выводы

1. Приведены расходы компонентов на приготовление каркасной смеси, обладающей высокими прочностными показателями.
2. Установлены упруго-прочностные свойства каркасных металлобетонов на алюминиевом связующем и заполнителях различной природы.
3. Предложена инженерная методика, по числовой оценке, однородности исследуемых составов каркасных металлобетонов с заполнителями различной природы.
4. В дальнейших исследованиях предполагается определение числовых оценок (метрик) однородности составов, гарантирующих допустимые значения, определяемые лицом, принимающего решения.

### Библиографический список

1. Структурообразование, технология изготовления и свойства бетонов нового поколения / В. Т. Ерофеев, О. В. Тараканов, И. Н. Максимова [и др.]. – Саранск : Издательский Дом "Академия Естествознания", 2023. – 248 с. – ISBN 978-5-7103-4455-2. – EDN ISGALE.
2. Баженов, Ю. М. Оценка технико-экономической эффективности нанотехнологий в строительном материаловедении / Ю. М. Баженов, Е. В. Королев // Строительные материалы. – 2009. – № 6. – С. 66-67. – EDN KUUCBL.
3. Интеллектуальный динамичный бетон / Б. Барраган, Х. Ронсеро, Р. Магаротто и др. // Междунар бетон пр-во. – 2011. – № 2. – С. 58-67.
4. Калашников, В. И. Высокопрочные и особовысокопрочные бетоны с дисперсным армированием / В. И. Калашников, С. В. Ананьев // Строительные материалы. – 2009. – № 6. – С. 59-61. – EDN KUUCAN.
5. Калашников, В. И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В. И. Калашников, В. Т. Ерофеев, О. В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 4(688). – С. 30-37. – EDN WEARYR.
6. Каприелов С. С. Цементы и добавки для высокопрочных бетонов / С.С. Каприелов // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016) : Сб. тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Казань, 2016, – С. 38–39.
7. Алюминиевые сплавы. Плавка и литье алюминиевых сплавов / под ред. В. И. Добаткина. – М. : Металлургия, 1970. – 416 с.
8. Казаков П. Ф. Технология металлов и других конструкционных сплавов / Н. Ф. Казаков, А. М. Осокин, А. П. Шишкова. – М. : Металлургия, 1975. – 688 с.
9. Колашников А. И. Армирование цветных металлов и сплавов волокнами / А. И. Колашников, В. Ф. Мануйлов, Е. В. Ширяев. – М. : Металлургия, 1974. – 248 с.
10. Бобрышев, А. Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем / А. Н. Бобрышев, В. Т. Ерофеев, В. Н. Козомазов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма "Наука", 2012. – 474 с. – ISBN 978-5-02-025495-4. – EDN SNENQF.
11. Лаптев Г. Л. Металлобетоны (структурообразование, технология, свойства) : монография / Г. А. Лаптев. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2011. – 144 с.
12. Соломатов В. И. Метон – новый конструкционный материал / В. И. Соломатов, Ю. Б. Потапов // Строительные материалы. – 1978. – № 3. – С. 11.
13. Потапов Ю. Б. Метон – новый строительный материал / Ю. Б. Потапов, В. И. Соломатов, Г. А. Лаптев // Строительные материалы и конструкции. – 1980. – С. 3.
14. Потапов Ю. Б. Технология металлических бетонов / Ю. Б. Потапов, В. И. Соломатов, Г. А. Лаптев // Исследование и практика заводского производства железобетона. – М. : НИИЖБ, 1982. – С. 23–25.
15. Потапов Ю. Б. Метоны – композиционные строительные материалы на металлических связующих / Ю. Б. Потапов, В. И. Соломатов, Г. А. Лаптев // Исследования строительных конструкций с применением полимерных материалов. – Воронеж : [б. и.], 1985. – 0,5 п. л.
16. Потапов Ю. Б. Метоны – высокоэффективные композиты / Ю. Б. Потапов, В. И. Соломатов, Г. А. Лаптев // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. – 1996. – № 9. – С. 76–86.
17. Исследование прочности и жесткости металлобетонов методом численного моделирования / П. С. Ерофеев, Г. А. Лаптев, А. И. Меркулов, В. Т. Ерофеев // Вестник Мордовского университета. – 2008. – Т. 18, № 4. – С. 86-91. – EDN MQFPCТ.
18. Ерофеев, В. Т. Каркасные строительные композиты : специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ерофеев Владимир Трофимович. – Москва, 1993. – 51 с. – EDN ZJHEOZ.
19. Ерофеев, В. Т. Методы обработки экспериментальных данных / В. Т. Ерофеев, И. Н. Максимова, В. В. Афонин ; Национальный исследовательский Мордовский



государственный университет им. Н.П. Огарева,  
Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства. – Саранск :  
Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет им. Н.П. Огарёва,

2019. – 140 с. – ISBN 978-5-7103-3735-6. – EDN  
ZBQYQX.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 04.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья

УДК 624 + 624.04

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

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

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_76

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В ЛИНЗООБРАЗНОМ ПОКРЫТИИ МЕМБРАННО-СТЕРЖНЕВОГО СООРУЖЕНИЯ

© Авторы, 2023

SPIN: 5032-7601

**КИМ Алексей Юрьевич**

доктор технических наук, профессор

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

*(Россия, Саратов, e-mail: sberbanksp@yandex.ru)*

SPIN: 4708-2844

**АМОЯН Миша Фрикович**

аспирант

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

*(Россия, Саратов, e-mail: ezid-007@yandex.ru)*

**ХАПИЛИН Виктор Евгеньевич**

аспирант

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

*(Россия, Саратов, e-mail: khapilin2010@yandex.ru)*

**Аннотация.** В статье рассказывается об одном из видов нелинейности, а именно о конструктивной нелинейности сооружений. Это не очень хорошо исследованная тема, в тоже время не учет конструктивной нелинейности приводит к неточному конечному результату, что может привести к потере устойчивости, поэтому данная тема достаточно актуальна. В статье описывается расчет мембранно-стержневых сооружений с учетом конструктивной нелинейности, описываются основные признаки конструктивной нелинейности, которые присущи данным сооружениям. т.е. зависимость деформации сооружения от приложенной к нему нагрузки, обусловленной изменением расчётной схемы в процессе его деформации, как правило структурными изменениями в конструкции, включением или выключением связей, изменением их положения, изменением координат точек сооружения за счёт перемещений при расчёте «по деформированной схеме». Конструктивная нелинейность присуща конструкции при разрушении, когда связи выключаются из работы, но могут быть варианты, когда связи после выключения из работы, например если покрытие сооружения очистили от снега, то снова включились в работу, а когда снег выпал вновь и связи заработали снова, до следующего выключения из работы.

**Ключевые слова:** расчет мембранно-стержневых сооружений с учетом нелинейных факторов; учет конструктивной нелинейности; расчет с помощью специализированного программного комплекса; выключение гибких элементов сооружения из работы под действием внешних факторов; строительная механика

**Для цитирования:** Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин Е.В. Исследование конструктивной нелинейности в линзобразном покрытии мембранно-стержневого сооружения // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 76-81. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_76



Original article

## INVESTIGATION OF CONSTRUCTIVE NONLINEARITY IN THE LENS-LIKE COATING OF A MEMBRANE-ROD STRUCTURE

© The Author(s) 2023

**KIM Alexey Yurievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
(Russia, Saratov, e-mail: sberbanksp@yandex.ru)*

**AMOYAN Misha Frykovich**

PhD Candidate

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
(Russia, Saratov, e-mail: ezid-007@yandex.ru)*

**KHAPILIN Viktor Evgenievich**

PhD Candidate

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
(Russia, Saratov, e-mail: khapilin2010@yandex.ru)*

**Annotation.** The article outlines one of the types of nonlinearity, specifically the structural nonlinearity of structures. This topic is not extensively studied, however, neglecting the consideration of constructive nonlinearity can lead to an inaccurate final result, which can result in a loss of stability. Therefore, this topic is quite relevant. The article describes the calculation of membrane-rod structures by considering structural nonlinearity and outlines the main features of structural nonlinearity that are inherent in these structures. The aforementioned refers to the dependence of the deformation of the structure on the load applied to it, resulting from alterations in the design scheme during its deformation, typically involving structural modifications, such as switching on or off connections, altering their position, or altering the coordinates of points of the structure due to movements during the calculation "in accordance with the deformed scheme". Constructive nonlinearity is inherent in the structure during destruction, when the connections are disabled but there may be options, when the connections are turned off after the shutdown, for example, if the coating of the structure was cleared of snow, then they turned back on, and when the snow fell again and the connections started working again, until the next shutdown from work.

**Keywords:** calculation of membrane-rod structures considering nonlinear factors; consideration of constructive nonlinearity; calculation with a specialized software package; disabling the flexible elements of the structure from work under the influence of external factors; construction mechanics

**For citation:** Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Investigation of constructive nonlinearity in the lens-like coating of a membrane-rod structure // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 76-81 (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_76

### Введение

Конструктивная нелинейность, самая малоизученная тема в нашей строительной механике, ученые, как правило, данную тему всегда обходили стороной. Только в последние два десятилетия стали активно публиковаться исследования по конструктивной нелинейности сооружений и её учету. Опубликованные работы в основном раскрывают конструктивную нелинейность классических сооружений. Исследования по учету конструктивной нелинейности пневматических сооружений в основном описывают их главную проблему - потерю устойчивости при выключении из работы гибких элементов.

Целью настоящей работы является исследование конструктивной нелинейности линзы покрытия мембранно-стержневого сооружения,

пролетом 60 метров. Авторами рассмотрен пример такого выключения из работы. В данном примере на шестиугольное в плане мембранно-пневматическое сооружение действует снеговая нагрузка. С поэтапным изменением нагрузки увеличивается число гибких вант, которые выключаются из работы, тем самым перестают усиливать мембраны (рисунки 1 и 2).

Вышеописанная ситуация является не критичной и закладывается при проектировании данных сооружений. Ванты являются вспомогательными элементами в несущей конструкции, тогда как основную функцию устойчивости здания выполняют предварительно напряженные мембраны, в которых нагрузка с верхнего пояса передается на нижний несущий. Хотя при увеличении прогибов до 1/75 пролёта грозит

безопасной эксплуатации сооружения, поэтому данный факт надо закладывать при расчете на устойчивость. Расчетная схема такого сооружения показана на рисунке 3 [1; 5].

Из предыдущих исследований авторов данной работы известно, что толщина верхней мембраны линзообразного мембранно - пневматического покрытия сооружения должна быть 3 мм и толщина нижней мембраны 4 мм при усилении линзы тремя стойками, для повышения несущей способности покрытия сооружения. В данной статье проведено аналогичное численное исследование на линзообразном мембранно-стержневом сооружении пролетом 60 метров. Для удобства сравнения толщины мембран данного мембранно-стержневого сооружения мы взяли такими же, 3 и 4 миллиметра соответственно. См. расчетную схему такого сооружения на рис. 3 [2-4].



Рисунок 1 - Быстровозводимое мембранно-стержневое сооружение шестиугольного очертания пролетом 60 метров

## Методология.

Расчет вели с помощью программного комплекса «Расчет пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов», составленного некоторое время назад авторами данной статьи. Для расчета был использован шаговый метод с применением численной процедуры Эйлера–Коши и метод конечного элемента. В процессе вычислений удалось доказать взаимосвязь влияния конструктивной нелинейности пространственной мембранно-стержневой системы на результаты расчёта геометрически нелинейной системы. Конструктивная нелинейность вызывает увеличение перемещений узлов системы, снижение до нуля усилий в выключаемых элементах и может вызвать уменьшение в несколько раз усилий в соседних элементах. Это актуально при затяжных снегопадах, когда с части крыши снег был очищен, с другой части снег не очищался. В таких случаях особенно ярко проявится конструктивная нелинейность, в одних вантах усилия будут близки к нулю, в других они уменьшатся, а в некоторых вантах наоборот усилия резко возрастут. Это и есть изменения расчетной схемы сооружения, вызванные конструктивной нелинейностью. Для более точного изложения материала приводим выписку из результатов счета, для тестовой задачи по определению конструктивной нелинейности системы.

В таблице 1 приведены численные значения прогибов системы, полученные итерационным методом последовательных нагружений с поэтапным применением метода конечных элементов (один шаг нагружения при четырех итерациях на шаге).

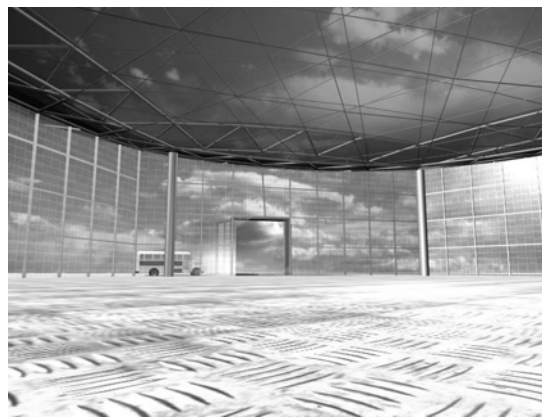


Рисунок 2 - Интерьер шестиугольного мембранно-стержневого сооружения пролетом 60 метров

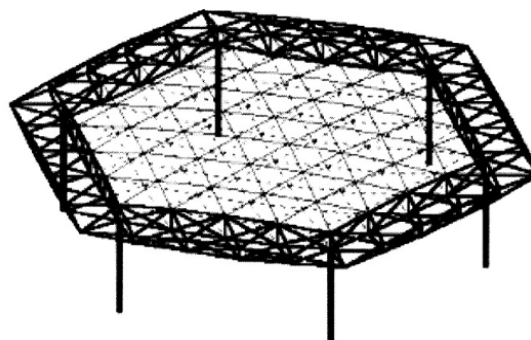


Рисунок 3 - Расчетная схема шестиугольного мембранно-стержневого сооружения

## Тестовая задача 1

Расчет мембранно-стержневого шестиугольного сооружения с учетом геометрической и конструктивной нелинейности на действие снеговой нагрузки на всем пролете

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

Величина пролета внешних углов, исследуемого конструкции.  $D = 60$  (м).

Максимальная высота конструкции  $H = 16.087$  (м).

Длина одной панели конструкции  $LP = 6$  (м).

Общее количество групп стержней  $GR = 8$ ; количество узлов системы  $K = 194$ .

Число узлов, имеющих искомое перемещение  $KH = 176$ .

Номер первого промежуточного узла  $K1 = 177$ .

Площади поперечных сечений стержней сооружения из разных групп:

$FS(1) = 5.97E-04(m^2); FS(2) = 5.97E-04(m^2);$

$FS(3) = 5.97E-04(m^2);$

$FS(4) = 2.34E-03(m^2); FS(5) = 3.88E-05(m^2);$

$FS(6) = 4.9E-02(m^2);$

$FS(7) = 4.4E-03(m^2); FS(8) = 1.96E-03(m^2).$



Таблица 1

| Суммарные перемещения узлов при действии силовой нагрузки (м) |              |              |              |                            |              |              |              |
|---------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Число шагов НК = 1; Число итераций СК = 4                     |              |              |              |                            |              |              |              |
| Шаг N = 1; Итерация CI = 1                                    |              |              |              | Шаг N = 1; Итерация CI = 4 |              |              |              |
| № узла                                                        | U<br>(ось X) | V<br>(ось Y) | W<br>(ось Z) | № узла                     | U<br>(ось X) | V<br>(ось Y) | W<br>(ось Z) |
| 1                                                             | -2,5E-05     | 0,034464     | -4,4E-05     | 1                          | 0,000226     | 0,033441     | 0,000393     |
| 2                                                             | 0,000736     | 0,061184     | 0,003847     | 2                          | 0,000941     | 0,060045     | 0,004731     |
| 3                                                             | 0,000257     | 0,066895     | 0,001898     | 3                          | 0,000342     | 0,065803     | 0,003264     |
| 4                                                             | -0,00026     | 0,066895     | 0,001898     | 4                          | -0,00034     | 0,065803     | 0,003264     |
| 5                                                             | -0,00074     | 0,061184     | 0,003847     | 5                          | -0,00094     | 0,060045     | 0,004731     |
| -                                                             | -            | -            | -            | -                          | -            | -            | -            |
| 44                                                            | 0,015335     | 0,360339     | -1,9E-15     | 44                         | 0,012264     | 0,349124     | 7,07E-07     |
| 45                                                            | 0,010216     | 0,4578       | -1,7E-15     | 45                         | 0,008259     | 0,444455     | 7,07E-07     |
| 46                                                            | -6,6E-15     | 0,488876     | -2,5E-15     | 46                         | -1,7E-15     | 0,474963     | 7,07E-07     |
| 47                                                            | -0,01022     | 0,4578       | -3E-15       | 47                         | -0,00826     | 0,444455     | 7,07E-07     |
| 48                                                            | -0,01534     | 0,360339     | -3,4E-15     | 48                         | -0,01226     | 0,349124     | 7,07E-07     |

РАСЧЁТНАЯ СХЕМА ПОКРЫТИЯ

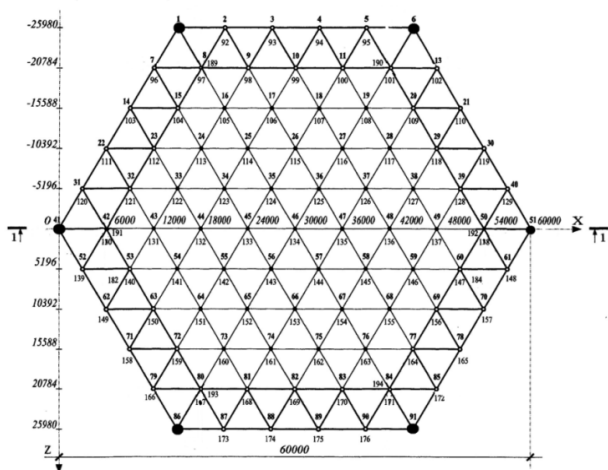


Рисунок 4 - Расчетная схема мембранно-стержневого сооружения к задаче 1

Распечатка данных численного исследования  
РАСЧЁТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ  
СИЛОВОЙ НАГРУЗКИ:

Наибольшее поперечное изменение расстояния в  
центре системы:

$V(44) = 0,3603(\text{м})$ , что менее  $6,0\text{E}-01(\text{м}) (L/100)$ .

Наибольшее усилие и его увеличение:

в элементах контурных ферм верхнего пояса

МРК=500754(Н) и DMPK=386154(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=458371(Н) и DMPK=344630(Н) при N=1 и CI=4;

в элементах контурных ферм нижнего пояса

МРК=831884(Н) и DMPK=293475(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=860348(Н) и DMPK=290093(Н) при N=1 и CI=4;

в вертикальных стойках контурных ферм

МРК=-178602(Н) и DMPK=-180602(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=-168932(Н) и DMPK=-171102(Н) при N=1 и CI=4;

в раскосах контурных ферм

МРК=-148323(Н) и DMPK=-148323(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=-159334(Н) и DMPK=-159151(Н) при N=1 и CI=4;

в фиктивных стержнях вертикальных колонн

МРК=6374(Н) и DMPK=6374(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=6701(Н) и DMPK=6701(Н) при N=1 и CI=4;

в вертикальных колоннах

МРК=-541961(Н) и DMPK=-337500(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=-541961(Н) и DMPK=-337500(Н) при N=1 и CI=4;

в распорках двухпоясных вантовых ферм

МРК=-15079(Н) и DMPK=-17449(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=-18242(Н) и DMPK=-20554(Н) при N=1 и CI=4;

в вантах несущих и натягающих поясов

МРК=308912(Н) и DMPK=82512(Н) при N=1 и CI=1,

МРК=311280(Н) и DMPK=84898(Н) при N=1 и CI=4.

#### Результаты.

Проводя анализ полученных результатов, с уверенностью можно констатировать факт, что прослеживается симметрия в соответствующих прогибах и усилиях, что подтверждает о высоких показателях точности проводимого расчета. Анализ полученных результатов показывают, что влияние геометрической нелинейности на прогибы и усилия

системы проявляются незначительно (до 3 % на прогибы и до 12 % на усилия), что свидетельствует о высокой конструктивной жесткости системы и слабом проявлении кинематических, т.е. не упругих, перемещений узлов системы [6].

Сопоставим полученные результаты по прогибам и усилиям с учетом симметрии системы:

при действии силовой нагрузки  
- в прогибах  $V(44) = 0,349124$  (м);  $V(48) = 0,349124$  (м);

- в приращениях усилий  
 $DNAB(43,44) = -65813$  (Н);  $DNAB(48,49) = -65813$  (Н);

при действии температурной нагрузки  
- в прогибах  $V(44) = -0,00705$  (м);  $V(48) = -0,00705$  (м);

- в приращениях усилий  
 $DNAB(43,44) = 19719$  (Н);  $DNAB(48,49) = 19719$  (Н);

при действии осадки опор  
- в прогибах  $V(44) = 0,05017$  (м);  $V(48) = 0,05017$  (м);  
- в приращениях усилий  
 $DNAB(43,44) = -23817$  (Н);  $DNAB(48,49) = -23817$  (Н).

Результаты показывают, что симметрия в соответствующих прогибах и усилиях проявляется с высокой степенью точности, что свидетельствует о высокой точности расчёта сооружения. Разработанные алгоритмы и программы расчета мембранно-стержневых систем, основанные на сочетании метода последовательных нагружений с методом конечных элементов, позволяют рассчитать и запроектировать разнообразные по компоновочной схеме сооружения.

## Обсуждения.

По итогам проведенного исследования в тестовой задаче 1, а это данные таблицы можно выделить значения при которых ванты выключаются из работы системы в процессе четырех стадийного нагружения при увеличении снеговой нагрузки до 180 кПа.

Из таблицы 1 видно, что максимальное значение прогиба покрытия конструкции составило  $V(46) = 0,6517$  м. В таблице наглядно показано как из работы выключаются именно диагональные ванты покрытия мембранно-стержневого сооружения, исходящие из углов шарнирно-стержневой фермы, расположенной по контуру и узлов соседних с фермой, показанной на рисунке 6, рассматриваемый сегмент шестиугольного покрытия сооружения.

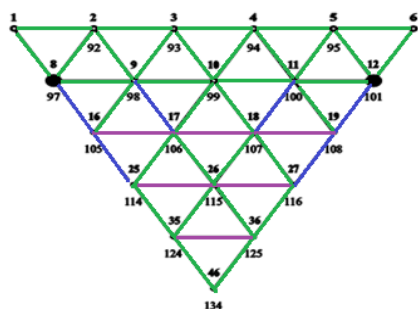


Рисунок 5 – Сегмент площади покрытия мембранно-стержневого сооружения

Таблица 2

| УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ОДНОГО СЕГМЕНТА ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ |                        |                        |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| N = 1; CI = 4                                                                    | N = 2; CI = 4          | N = 3; CI = 4          | N = 4; CI = 4      |
| N(1, 2)=-100999                                                                  | N(1, 2)=-200757        | N(1, 2)=-298444        | N(1, 2)=-401633    |
| <b>N(8, 16)=48506</b>                                                            | <b>N(8, 16)=22466</b>  | <b>N(8, 16)=0</b>      | <b>N(8, 16)=0</b>  |
| N(9, 10)=314091                                                                  | N(9, 10)=354661        | N(9, 10)=387205        | N(9, 10)=402606    |
| N(9, 16)=68044                                                                   | N(9, 16)=62384         | N(9, 16)=59253         | N(9, 16)=51329     |
| <b>N(9, 17)=51904</b>                                                            | <b>N(9, 17)=30878</b>  | <b>N(9, 17)=13401</b>  | <b>N(9, 17)=0</b>  |
| N(10, 11)=314091                                                                 | N(10, 11)=354661       | N(10, 11)=387205       | N(10, 11)=402606   |
| N(10, 17)=59968                                                                  | N(10, 17)=47192        | N(10, 17)=37951        | N(10, 17)=31758    |
| N(10, 18)=59968                                                                  | N(10, 18)=47192        | N(10, 18)=37951        | N(10, 18)=31758    |
| N(11, 12)=245364                                                                 | N(11, 12)=365666       | N(11, 12)=473969       | N(11, 12)=564572   |
| <b>N(11, 18)=51904</b>                                                           | <b>N(11, 18)=30878</b> | <b>N(11, 18)=13401</b> | <b>N(11, 18)=0</b> |
| N(11, 19)=68044                                                                  | N(11, 19)=62384        | N(11, 19)=59253        | N(11, 19)=51329    |
| <b>N(12, 19)=48506</b>                                                           | <b>N(12, 19)=22466</b> | <b>N(12, 19)=0</b>     | <b>N(12, 19)=0</b> |
| N(16, 17)=66199                                                                  | N(16, 17)=57579        | N(16, 17)=50564        | N(16, 17)=50663    |
| <b>N(16, 25)=50648</b>                                                           | <b>N(16, 25)=27760</b> | <b>N(16, 25)=7934</b>  | <b>N(16, 25)=0</b> |
| N(17, 18)=64889                                                                  | N(17, 18)=54780        | N(17, 18)=46149        | N(17, 18)=42090    |
| N(17, 25)=58747                                                                  | N(17, 25)=44515        | N(17, 25)=33654        | N(17, 25)=23279    |
| N(17, 26)=53402                                                                  | N(17, 26)=33956        | N(17, 26)=18111        | N(17, 26)=5978     |
| N(18, 19)=66199                                                                  | N(18, 19)=57579        | N(18, 19)=50564        | N(18, 19)=50663    |
| N(18, 26)=53402                                                                  | N(18, 26)=33956        | N(18, 26)=18111        | N(18, 26)=5978     |
| N(18, 27)=58747                                                                  | N(18, 27)=44515        | N(18, 27)=33654        | N(18, 27)=23279    |
| <b>N(19, 27)=50648</b>                                                           | <b>N(19, 27)=27760</b> | <b>N(19, 27)=7934</b>  | <b>N(19, 27)=0</b> |

При анализе результатов численного исследования полученных при решении тестовой задачи 1 и определение величины конструктивной нелинейности в мембранно-стержневом сооружении нагруженном снеговой нагрузкой на половине пролета можно сделать следующие выводы:

-на третьем шаге расчета ванты 8-16 и 12-19 выключаются из расчетной схемы;

-на четвертом шаге расчета ванты 16-25, 19-27, 9-17 и 11-18 выключаются из расчетной схемы (см. рис. 4-5).



*Выводы исследования.*

В данной задаче рассмотрен один из типов конструктивной нелинейности характерный для покрытий сооружений, содержащих в своём составе гибкие элементы, работающие только на растяжение, или, проще говоря, ванты. В расчете таких конструкций следует учитывать деформации элементов и своевременно исключать из расчетной схемы ванты, начинающие «воспринимать» сжимающие нагрузки. В нашем случае из работы на некоторое время были выключены несколько вант, в нескольких вантах возросли усилия, из-за прогиба изменились положения координат точек сооружения за счёт перемещений при расчёте «по деформированной схеме» — это является вторым видом конструктивной нелинейности, выявленной в данной работе.

Подводя итог по результатам расчета можно сделать следующий вывод: оказанное влияние геометрической нелинейности на прогибы и усилия системы составляет до 3 % на прогибы и до 12 % на усилия, что является незначительной величиной. Данный факт свидетельствует о высокой жесткости и устойчивости системы. Про конструктивную нелинейность можно сказать следующее: в данной задаче она проявляется значительно, так как после очистки от снега сектора покрытия, произошло отключение из работы системы ряда вант и значительное перераспределение усилий в вантах покрытия сооружений, в некоторых случаях усилия выросли примерно на 40%, в других случаях произошло их уменьшение примерно на треть. Фиолетовым цветом обозначены ванты (см. рис. 5), в которых усилие стали меньше, синим цветом ванты, которые отключились из работы, а зеленым ванты, в которых усилие или осталось без изменения или выросли.

Если сравнивать полученные авторами данной работы результаты с данными полученными другими учеными, как в нашей стране, так и за рубежом, то можно сказать, что порядок полученных данных одинаковый, но сами результаты немного отличаются - китайские ученые в своих статьях пишут о высокой нелинейности покрытий над транспортным узлом в городе Тяньцзинь в Китае [7].

Учитывая разность методов учета, применение других программных комплексов, различие в объектах исследования можно сказать, что результаты получены аналогичные.

**Библиографический список**

1. Беленя Е.И. Предварительно напряженные металлические листовые конструкции / Е.И. Беленя. - М.: Стройиздат, 1979. - 504 с.
2. Ким, А. Ю. Статический расчет несущей способности двухпоясной мембранно-стержневой системы с учетом воздухоопорного эффекта с применением численной процедуры Эйлера-Коши / А. Ю. Ким, М. Ф. Амоян, В. Е. Хапилин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2021. – Т. 48, № 4. – С. 159-170. – DOI 10.21822/2073-6185-2021-48-4-159-170. – EDN PKQRPU.
3. Ким, А. Ю. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом / А. Ю. Ким, М. Ф. Амоян, Е. Х. Хапилин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49, № 1. – С. 122-132. – DOI 10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132. – EDN WUAKZZ.
4. Ким, А. Ю. Статический расчет на устойчивость линзообразного мембранно-пневматического покрытия сооружения / А. Ю. Ким, М. Ф. Амоян, В. Е. Хапилин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1(300). – С. 14-20. – DOI 10.37538/0039-2383.2022.10.104.20. – EDN FTLOXE.
5. Кузнецов Э. Н. Вопросы теории висячих систем: Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко. – М.: 1967. - 18 с.
6. Нургазиев Р.Б. Статический расчет пространственных мембранно-стержневых систем с учетом геометрической и конструктивной нелинейности автореферата по ВАК РФ 05.23.17: автореферат дис. кан. тех.наук. – Волгоград: 2004. – 17 с.
7. 张爱玲在北京建筑与土木工程大学建筑公报中的建设性非线性类型北京2013. -第47-53页

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 28.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 28.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.





Научная статья

УДК 624 + 624.04

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

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

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_82

## НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЛИНЗООБРАЗНЫХ МЕМБРАННО-ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ УНИВЕРСАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© Авторы, 2023

SPIN: 5032-7601

**КИМ Алексей Юрьевич**

доктор технических наук, профессор

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

*(Россия, Саратов, e-mail: sberbanksp@yandex.ru)*

SPIN: 9170-2110

**ПОЛНИКОВ Сергей Валерьевич**

аспирант

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

*(Россия, Саратов, e-mail: ezid-007@yandex.ru)*

**ХАПИЛИН Виктор Евгеньевич**

аспирант

*Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

*(Россия, Саратов, e-mail: khapilin2010@yandex.ru)*

**Аннотация.** В данной статье описывается расчет с учетом нелинейных факторов линзообразных мембранно-пневматических сооружений различного назначения. Такие сооружения появились в нашей стране в конце прошлого века и уже заняли определенную нишу в создании современной инфраструктуры наших городов и поселков. Такие сооружения удобны тем, что могут быть возведены за несколько месяцев и их можно достаточно быстро перепрофилировать в нужный на данный момент объект. Их расчет достаточно сложен и предполагает применение специальных программ, которые позволяют рассчитывать сооружения с учетом нелинейностей и с учетом упругих свойств воздуха в линзообразном покрытии сооружения.

**Ключевые слова:** расчет линзообразных мембранно-пневматических сооружений; расчет сооружений с учетом нелинейных факторов; учет упругих свойств сжатого воздуха; геометрическая нелинейность линзообразного сооружения; строительная механика

**Для цитирования:** Ким А.Ю., Полников С.В., Хапилин Е.В. Нелинейный расчет большепролетных линзообразных мембранно-пневматических сооружений универсального назначения // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 82-88. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_82



Original article

## NONLINEAR CALCULATION OF LARGE-SPAN LENTICULAR MEMBRANE-PNEUMATIC STRUCTURES OF UNIVERSAL PURPOSE

© The Author(s) 2023

**KIM Alexey Yurievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*

*(Russia, Saratov, e-mail: sberbanksp@yandex.ru)*

**POLNIKOV Sergey Valeryevich**

PhD Candidate

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*

*(Russia, Saratov, e-mail: ezid-007@yandex.ru)*

**KHAPILIN Viktor Evgenievich**

PhD Candidate

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*

*(Russia, Saratov, e-mail: khapilin2010@yandex.ru)*

**Annotation.** This article describes the calculation taking into account nonlinear factors in lenticular membrane-pneumatic structures for various purposes. Such structures appeared in our country at the end of the last century and have already occupied a certain niche in the creation of modern infrastructure in our cities and towns. Such structures are convenient because they can be erected in a few months, and can be quickly repurposed into the desired object at the moment. Their calculation is quite complicated and involves the use of special programs that allow you to calculate structures considering non-linearities and the elastic properties of air in the lens-like coating of the structure.

**Keywords.** Calculation of lenticular membrane-pneumatic structures; calculation of structures considering nonlinear factors; consideration of elastic properties of compressed air; geometric nonlinearity of a lenticular structure; construction mechanics

**For citation:** Kim A.Yu., Polnikov S.V., Khapilin V.E. Nonlinear calculation of large-span lenticular membrane-pneumatic structures of universal purpose // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 82-88. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_82

### Введение

Во второй половине двадцатого века началось исследование линзообразных мембранно-пневматических систем с использованием различных методов, который позволяли рассчитывать пневматическую систему с разделением на несущие и напрягающие пояса, а сжатый воздух рассматривался как способ создания давления на гибкие мембраны. Западные, да и отечественные проектировщики задавали значения избыточного давления в замкнутой полости пневматической линзы примерно от 500 до 1500 Па. Пневматические сооружения средних пролетов, примерно до восемнадцати метров были впервые построены в США и Японии в конце шестидесятых прошлого века. Возведение линзообразных мембранно-пневматических систем началось в США и других странах в семидесятые-восемидесятые годы двадцатого века, о чем было неоднократно сказано на международных конференциях, посвященных пневматическим системам [6-7].

Целью данной статьи было показать главную особенность таких пневматических систем их высокую нелинейность. Учет геометрической и физической нелинейности таких сооружений авторами данной статьи производился итерационным методом приращений параметров с применением численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Авторы статьи опубликовали несколько научных работ, в которых была изложена теория о работе в таких сооружениях сжатого воздуха, который находится между гибких мембран покрытия линзообразного сооружения и фактически является частью объекта, своего рода строительной конструкцией в виде условных стоек, с помощью которых передается нагрузка с верхней мембраны на нижнюю. Существенно увеличить пролет пневматической линзы в течение двадцатого века не удавалось, особенно если это были воздухоопорные системы с низким избыточным давлением воздуха, помогало только усиление сооружения стальными канатами. Такие результаты отмечались многими учеными, работающими в

данном направлении. Это явление можно объяснить с точки зрения строительной механики. Попытки увеличить пролет конструкции при низком давлении воздуха под мембранными линзообразного покрытия сооружения не увенчались успехом, так как расчет стал нестабильным. Это происходило независимо от толщины мембран покрытия сооружения, чем больше толщина мембран, то тем больше сметная стоимость и вес сооружения [1-2].

Если давление воздуха слишком мало, то система будет неустойчивой, у нее будет низкая несущая способность, если давление воздуха слишком велико, то система будет слишком жесткой и также неустойчивой. Однако, если давление воздуха находится в определенном диапазоне и соответствующая нагрузка приложена, то система будет устойчивой и можно получить достоверный результат расчета на ЭВМ.

## Методология.

Исследования проф. Кима А.Ю., а также и его аспирантов, смогли установить, что в процессе нагружения гибкой пневмолинзы реальными нагрузками существенно изменяется объем накачанной пневматической линзы и, вследствие этого, изменяется величина прогибов и усилий в поясах линзы. Происходит существенное изменение расчетных величин. В некоторых случаях при расчете сугубо нелинейных систем возможности численной процедуры Эйлера-Коши становятся недостаточными. После получения результатов численного исследования, можно сделать вывод, что геометрическую нелинейность таких систем удавалось учесть, за счет незначительного увеличения итераций (10-15 итераций), но часто невозможно было достаточно точно учесть физическую нелинейность сжатого воздуха гибкими поясами покрытия сооружения, обусловленную нелинейно упругими свойствами воздуха, так как для этого требуется увеличить число итераций до двадцати пяти и выше. Чтобы учесть физическую нелинейность, необходимо проводить более сложные расчеты, используя нелинейные уравнения состояния воздуха и учитывая зависимость его свойств от давления и температуры. Такие расчеты требуют значительно больших вычислительных ресурсов и времени, и могут быть сложными для практической реализации, по этому одной из задач поставленных в статье было определение явления последействия или точное определение физической нелинейности воздуха, закаченного между мембранами покрытия сооружения. Для более точного учета всех видов нелинейности, которые присущи данным системам применена совокупность уравнений, как хорошо известных, таких как численная процедура Эйлера-Коши и универсальное уравнение состояния газа, так и разработанная авторами статьи формула учета приращения давления, с помощью которых и рассчитывается геометрическая и физическая нелинейность воздуха в замкнутой полости покрытия сооружения [4-5].

Приведем систему уравнений для расчета сооружений такого рода:

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=c} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu} \left( x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2} \right),$$

где  $3 \leq C_k \leq 30$ ,

где численная процедура Эйлера-Коши третьего порядка точности шагового метода с увеличенным числом итераций до 30;

$\Delta P(c+1) = \Delta P(c) + DP(c)$ ., формула для определения приращения давления внутри пневмолинзы;

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T}, \text{ универсальное уравнение состояния газа.}$$

Алгоритмы методики позволяют рассчитывать на ЭВМ конструкции пространственных сооружений, но в данной статье авторами исследуется плоскостное покрытие. При этом расчетная схема сооружения получена вырезанием поясных полос линзы двумя вертикальными параллельными плоскостями, когда искомыми функциями являются две функции прогибов несущего пояса и две функции прогибов натягающего пояса. Мембранные пояса системы по концам закреплены в виде неподвижных шарниров, которые могут получить смещения (см. рис. 1-3). Система рассчитывается шаговым методом с применением на шаге метода конечных элементов в форме метода перемещений. Такие сооружения являются экономически эффективными, так как дешевле сооружений из традиционных материалов примерно в два раза, за счет заводского изготовления и отверточной сборки прямо на строительной площадке, срок возведения такого сооружения составляет несколько месяцев, что в определенных условиях имеет большое значение.

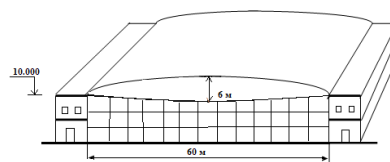


Рисунок 1 - Исследуемое сооружение с пролетом 120 метров линзообразным мембранно-пневматическим покрытием

Такие сооружения хорошо держат ветровую и снеговую нагрузку, могут быть возведены как в южных жарких регионах нашей страны, так и в районах Крайнего Севера.

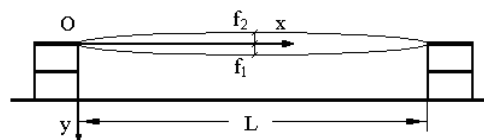


Рисунок 2 Однопролетное линзообразное мембранно-пневматическое покрытие сооружения прямоугольного в плане

Данные сооружения могут быть возведены в сейсмоопасных районах и могут выдержать землетрясение интенсивностью до восьми баллов.

Они могут быть достаточно быстро перепрофилированы для другого назначения, например спортивный комплекс может быть при необходимости использовать как госпиталь или общежитие для мобилизованных военнослужащих, что в современных условиях является немаловажным фактором.

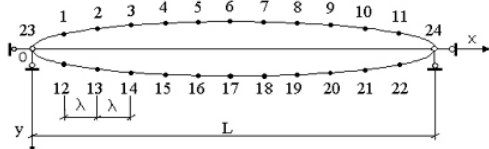


Рисунок 3 Расчетная схема однопролетной линзообразной мембранно-пневматической системы

В данной статье выполнены нелинейные расчеты усиленных повышенным избыточным давлением воздуха линзообразных мембранно-пневматических систем пролетом шестьдесят метров. Численные расчеты с учетом всех нелинейных факторов могли быть произведены только по новой методике и соответствующей программе расчета систем на ЭВМ. Прежние методики расчета пневматических систем позволяли рассчитать системы только малых и средних пролетов, несущая способность которых мала, как мала и физическая нелинейность воздуха линзы. Увеличение избыточного давления воздуха в линзе позволяло получить какие-то результаты, так как определитель уравнений МКЭ отдался от нуля. Но при этом резко возрастала физическая нелинейность воздуха и требовалась новая методика, позволяющая учесть ту часть физической нелинейности, которая прежними методиками не могла быть учтена и расчет был неточным.

Далее приводятся результаты расчета однопролетной классической (то есть состоящей из двух мембранных поясов с воздухом между ними) усиленной повышенным избыточным давлением воздуха линзообразной мембранно-пневматической системы пролетом шестьдесят метров на действие температурного воздействия.

#### Расчет на температурную нагрузку мембранно-пневматической системы, пролетом 60 м

Действует температурная нагрузка  $T_L$   
(ОДИН ШАГ)

Статический расчет мембранно-пневматической конструкции, рисунок 1.

Расчетная схема рис. 2. Для расчета применена программа (PNSK6XQ2) и OUSK6LQ2.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Количество шагов  $NC = 1$

Количество итераций на одном шаге  $KP = 24$

Признак падения и возрастания давления  $P = 0$

Наличие силы  $Q = 0$

Наличие воздействия температуры  $T = 1$

Наличие воздействия кинематической силы  $C = 0$

ЕI% - индикатор наличия изгиба, 1-есть, 0-нет,  $EU = 1$   
Протяженность конструкции между точками опоры  $L = 60$

Число узлов системы  $K = 24$

Массив групп стержней, соответствующих столбцам матрицы BAR

$SR(1) = 1$   $SR(2) = 1$   $SR(3) = 2$   $SR(4) = 2$   $SR(5) = 3$

Сверхнормативное давление в линзе на момент монтажа  $EP1(AL) = 3000$

Увеличение давления воздуха за счет подкачки  $EP(AL) = 0$

Температура поясов линз по Кельвину на стадии монтажа

$TH1(AL), TH2(AL) = 273, 273$

Изменение температурного режима поясов линз на стадии монтажа

$ETH1(AL), ETH2(AL) = 10, -25$

Концентрированные силы  $Q(I)$ , воздействующие на систему

$Q(0) = 0 (H)$   $Q(4) = 0 (H)$

-----  
 $Q(20) = 0 (H) Q(22) = 0 (H)$

Нагрузка на пояса от собственного веса, действующая на единицу длины

$Q1, Q2 = 320, 240 (H)$

Температурные воздействия  $TSH(S)$  на систему

$TSH(1) = 25$   $TSH(2) = -30$   $TSH(3) = 0$

Число узлов, имеющих искомое перемещение,  $KN = 22$

Количество панелей, составляющих элемент с изгибом  $NP = 12$

Параметры панели в изогнутом элементе  $LP = 5 (m)$

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ НА ШАГЕ $N = 1$

СЧЕТ НА ШАГЕ  $N = 1$   $CI = 1$

Величина объема полости линзы в процессе эксплуатации  $V2 = 229.63648483$

Изменение объема внутри полости линзы  $\Delta V = -4.233838386363D-02$

Давление внутри линзы  $P(AL \%) = 105508.4$

Температура внутри линзы измеряемая в Кельвинах  $T(AL \%) = 271.75$  град.

Изменение давления в линзе в результате деформации  $PC(AL \%) = 462.631$

СЧЕТ НА ШАГЕ  $N = 1$   $CI = 3$

Величина объема полости линзы в процессе эксплуатации  $V2 = 233.9915049812695$

Изменение объема внутри полости линзы  $\Delta V = -1.158858976609$

Давление внутри линзы  $P(AL \%) = 104541.5$

Температура внутри линзы измеряемая в Кельвинах  $T(AL \%) = 271.75$  град.

Изменение давления в линзе в результате деформации  $PC(AL \%) = 355.5182$



| ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ     | ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ                 |
|--------------------------------|------------------------------------------|
| U( 1 )= 6.2375648323377D-04    | V( 1 )= 5.735357343855203D-03            |
| U( 2 )= 9.004983367527766D-04  | V( 2 )= 1.041594366090791D-02            |
| U( 3 )= 8.960841462374397D-04  | V( 3 )= 1.398397771658597D-02            |
| U( 4 )= 7.297699444838915D-04  | V( 4 )= 1.698383360426715D-02            |
| U( 5 )= 4.034615599442055D-04  | V( 5 )= 1.869650528977978D-02            |
| U( 6 )=-1.15901314178968D-16   | <b><u>V( 6 )= .09960630824093462</u></b> |
| U( 7 )=-4.034615599444518D-04  | V( 7 )= 1.869650528978064D-02            |
| U( 8 )=-7.297699444841733D-04  | V( 8 )= 1.698383360426873D-02            |
| U( 9 )=-8.960841462377605D-04  | V( 9 )= 1.398397771658796D-02            |
| U( 10 )=-9.004983367530576D-04 | V( 10 )= 1.041594366090956D-02           |
| U( 11 )=-6.237564832339396D-04 | V( 11 )= 5.735357343856112D-03           |
| U( 12 )= 6.874332161928634D-04 | V( 12 )=-2.392626587393857D-03           |
| U( 13 )= 2.307460470771612D-04 | V( 13 )= 2.256413278985447D-03           |
| U( 14 )=-9.062541778945555D-04 | V( 14 )= 1.397416513479505D-02           |
| U( 15 )=-2.374871275555766D-04 | V( 15 )= 8.725363454998853D-03           |
| U( 16 )=-8.481909223919205D-05 | V( 16 )= .0104137744160529               |
| U( 17 )= 9.97133718337636D-17  | V( 17 )= .0190505248425937               |
| U( 18 )= 8.481909223940163D-05 | V( 18 )= 1.041377441605356D-02           |
| U( 19 )= 2.374871275558189D-04 | V( 19 )= 8.725363455000176D-03           |
| U( 20 )= 9.062541778948536D-04 | V( 20 )= 1.397416513479703D-02           |
| U( 21 )=-2.307460470769398D-04 | V( 21 )= 2.256413278986763D-03           |
| U( 22 )=-6.874332161927374D-04 | V( 22 )=-2.392626587393177D-03           |
| U( 23 )= 0                     | V( 23 )= 0                               |
| U( 24 )= 0                     | V( 24 )= 0                               |

#### СЧЕТ НА ШАГЕ N = 1 CI = 24

Результаты в конце шага N=1

Величина объема полости линзы в процессе эксплуатации V2= 233.8378868551774

Изменение объема внутри полости линзы  $\Delta V = - .3432381448225499$

Температура в линзе измеряемая в Кельвинах 271.75

Приращение давления в линзе PN(AL%) = **403.7062**

Избыточное давление в линзе PL(AL %) = 2596.294

#### Обсуждение.

Совместная физическая нелинейность работы воздуха, закаченного между гибких мембран покрытия сооружения и геометрическая составляет примерно 12 %, мы ее рассчитываем следующим образом берем значения приращения избыточного давления на последней итерации 403, 71 Па за 100%, а значение приращения давления на третьей итерации 355,52 Па за -х %, и из данной пропорции находим величину нелинейности. Далее по аналогичной формуле определяем геометрическую нелинейность в нашей задачи определили примерно



4%. По расчету получается, что требуется толщина мембран верхней напрягающей 3 мм и нижней несущей 4 мм. В предыдущей статье данных авторов получены результаты при двух шагах и множества итераций, поэтому сравнения результатов с результатами, полученными при одном шаге и двадцати четырех итерациях показали, что разность между результатами составляет менее 5 %, поэтому можно сделать вывод, что в данном случае достаточно применение одного шага и 20-25 итераций, если определяется физическая нелинейность работы сжатого воздуха и гибких мембран покрытия сооружения. Хотя при решении некоторых задач при исследовании мембранно-пневматических систем применение многошаговых методов обязательно [3; 9].

Если брать для сравнения аналогичный расчет мембранно-пневматического сооружения с усилением мембран покрытия сооружения стойками у других аспирантов научного руководителя Амояна М.Ф. и Нургазиева Р.Б., то получается, что значения величин геометрической и физической нелинейности работы воздуха, закаченного между гибких мембран покрытия сооружения, усиленного стойками примерно в два раза меньше чем у сооружений без усиления. Следовательно, опять подтверждается правило нелинейной строительной механики, что чем выше жесткость системы, тем меньше пролет, и тем меньше величины нелинейностей данного сооружения. За счет применения стоек стоимость всего сооружения меньше примерно на 8-10%, что при стоимости сооружения в 400 млн. руб. составит примерно около 40 млн., при стоимости стоек примерно 1 млн. рублей, так как значительно уменьшается толщина мембран сооружения и происходит экономия электроэнергии при подкачке воздуха в линзообразное покрытие мембранно-пневматического сооружения.

Выводы исследования. В результатах данной работы нельзя не заметить тот факт, что при наличии стоек наблюдается эффект значительного усиления жесткости и несущей способности сооружений подобного рода при больших пролетах. Количество и расстояние между стойками сооружения при проектировании можно изменять тем самым повышая ее устойчивость. Усиление несущей способности мембранно-пневматических систем возможно также за счет повышения избыточного давления воздуха в полостях пневмолинзы. Отметим, что пневмолинзы проектируются герметичными и могут быть поделены на несколько секций, т.е. работающими независимо друг от друга. С использованием новой методики статического расчета было проведено численное исследование линзообразных мембранно-пневматических систем, без усиления стойками и с усилением за счет применения трех стоек. Была показана достаточность проведения расчетов линзообразных покрытий при одном шаге нагружения и большом числе итераций,

учитывающих последствие избыточного давления воздуха. Более того, результаты показали, что использование стоек существенно уменьшает последствие от избыточного давления воздуха, т.е. физическую нелинейность сжатого воздуха и гибких мембран покрытия, что является еще одним плюсом новых линзообразных мембранно-пневматических систем. По результатам проведенного исследования сооружений, усиленных тремя стойками установлено, что физическая нелинейность работы воздуха, закаченного между гибких мембран покрытия сооружения составляет примерно 12 %, а геометрическая нелинейность примерно 4%. В нашем случае определена физическая нелинейность работы сжатого воздуха и гибких мембран линзообразного покрытия сооружения, она составляет примерно 8 %. За счет применения повышенного числа итераций, иногда число их доходило до 30, удалось учесть и ту часть физической нелинейности работы сжатого воздуха и мембран сооружения, которую невозможно рассчитать, используя традиционные три итерации численной процедуры формулы Эйлера–Коши. По результатам проведенного исследования были составлены графики, которые показаны на рисунках 4 -6 [8].

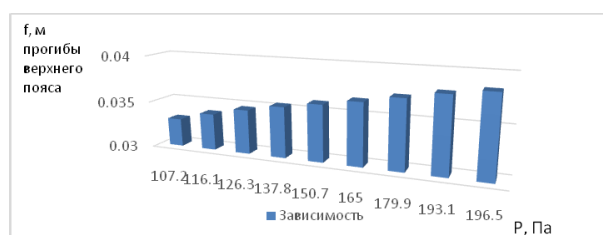


Рисунок 4 - Зависимость прогибов верхнего пояса от приращения давления в линзе покрытия

На рисунке 4 изображен график прогибов верхнего пояса покрытия сооружения, по которому видно, что если заданное по расчету давление в линзе покрытия сооружения составляет 104000 Па и на пояса линзы действует еще приращение давление от 100 до 200 Па, то прогиб верхнего пояса будет меньше на несколько сантиметров.

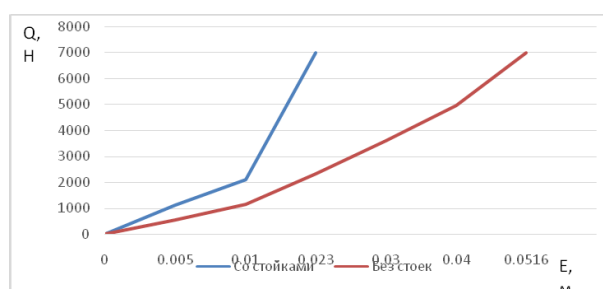


Рисунок 5- Геометрическая нелинейность одношаговый метод

На рисунке 5 показано определенное численным исследованием значение геометрической

нелинейности в покрытии линзы пневматического сооружения. По графику видно, что если увеличить жесткость линзы, за счет применения стоек, то геометрическая нелинейность будет меньше в полтора-два раза.

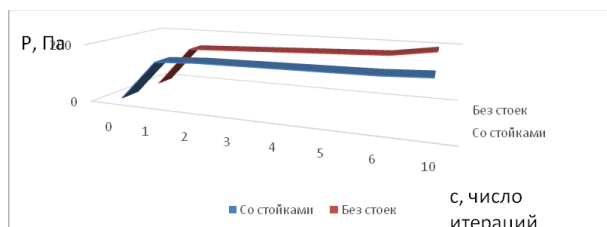


Рисунок 6 - График прогибов мембран в зависимости от усиления стойками мембран или без них

Соответственно изучая график, изображенный на рисунке 6 можно сделать вывод, что за счет применения стоек выросла несущая способность линзы покрытия сооружения и соответственно в линзе, усиленной стойками прогибы поясов будут примерно в полтора раза меньше, чем в линзе без усиления стойками.

В заключении статьи можно сделать вывод, что мембранно-пневматические системы сугубо нелинейные объекты, расчет которых без специальных методик, по которым можно рассчитывать все виды нелинейности невозможен.

## Библиографический список

1. Ким, А. Ю. Статический расчет несущей способности двухпоясной мембранно-стержневой системы с учетом воздухоопорного эффекта с применением численной процедуры Эйлера-Коши / А. Ю. Ким, М. Ф. Амоян, В. Е. Хапилин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2021. – Т. 48, № 4. – С. 159-170. – DOI 10.21822/2073-6185-2021-48-4-159-170. – EDN PKQRPU.
2. Ким, А. Ю. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных

линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом / А. Ю. Ким, М. Ф. Амоян, В. Е. Хапилин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49, № 1. – С. 122-132. – DOI 10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132. – EDN WUAKZZ.

3. Нургазиев, Р. Б. Статический расчет пространственных мембранно-стержневых систем с учетом геометрической и конструктивной нелинейности : специальность 05.23.17 "Строительная механика" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нургазиев Руслан Балтабайевич. – Волгоград, 2004. – 18 с. – EDN NIBLKL.
4. Применение шаговых методов для расчета большепролетных пневматических сооружений / А. Ю. Ким, С. В. Полников, А. С. Бердышев, Д. А. Борзенко // Научная дискуссия: вопросы технических наук. – 2015. – № 11(29). – С. 51-55. – EDN UZENKR.
5. Ким, А. Ю. Расчет воздухоопорных мембранно-пневматических сооружений с учетом геометрической нелинейности / А. Ю. Ким, С. П. Харитонов // Научное обозрение. – 2014. – № 12-3. – С. 744-746. – EDN TRNVMH.
6. Ermolov, V.V., Bird, W.W., Bubner, W. (1983). Pneumatic Building Structures. Moscow: Stroyizdat.- 439 p.
7. Voznsenskiy, S.B., Ermolov, V.V. (1975). Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad. Moscow: TzINIS Gosstroya USSR.-348 c.
8. Geiger, David (1975). Low-profile air structures in the USA. Building Research and Practice, March-April, p. 80-87.
9. Krivoshapko, S.N., Galishnikova, V.V. (2015). Architectural-and-Building Structures: Text Book, Moscow: Izd-vo "URAIT".- 476 p.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 09.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 09.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.





Научная статья  
УДК 691.32 : 666.3.046.4  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_89

## КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ С ВЫСОКОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ИСТИРАНИЮ<sup>1</sup>

© Авторы 2023  
SPIN-код: 1363-7913  
ORCID 0000-0003-0190-7133  
Scopus ID: 6603166237

**ПЛЕТНЕВ Петр Михайлович**  
доктор технических наук, профессор  
*Сибирский государственный университет путей сообщения;  
Новосибирский государственный аграрный университет  
(Россия, Новосибирск, e-mail: pletnev0@mail.ru)*

**СЕМАНЦЕВА Елена Сергеевна**  
аспирант  
*Сибирский государственный университет путей сообщения  
(Россия, Новосибирск)*

SPIN-код: 6495-0156

**ШАХОВ Сергей Александрович**  
доктор технических наук, профессор  
*Сибирский государственный университет путей сообщения  
(Россия, Новосибирск)*

**Аннотация.** В настоящее время керамические материалы благодаря своим физико-химическим и физико-механическим свойствам получили широкое применение при измельчении и гомогенизации шихт и водных суспензий. Однако керамика не в полной мере удовлетворяет требования по сроку службы и намолу истирающих тел. В ходе экспериментальных исследований показана возможность синтеза плателетных  $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$  в системе  $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  из прекурсора карбоната стронция с различным соотношением компонентов. При исследовании микроструктуры композита  $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{YZrO}_2$  выявлено наличие в структуре керамического материала плателетных структур, придающих керамике высокие физико-механические (прочность, трещиностойкость) и износостойкие характеристики.

**Ключевые слова:** мелющие тела; керамический материал; алюмоциркониевый композит; прочность; трещиностойкость; износостойкость

**Для цитирования:** Композитный материал с высокой устойчивостью к истиранию / П.М. Плетнев, Е.С. Семанцева, С.А. Шахов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 89-94. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_89

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).





## HIGHLY ABRASION RESISTANT COMPOSITE MATERIAL

© The Author(s) 2023

**PLETNEV Petr Mikhailovich**

doctor of technical sciences, professor  
*Siberian State Transport University;  
Novosibirsk State Agrarian University  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: pletnev0@mail.ru)*

**SEMANTSEVA Elena Sergeevna**

PhD Candidate  
*Siberian State Transport University  
(Russia, Novosibirsk)*

**SHAHOV Sergey Alexandrovich**

doctor of technical sciences, professor  
*Siberian State Transport University  
(Russia, Novosibirsk)*

**Abstract.** Nowadays, ceramic materials, due to their physicochemical and physical-mechanical properties, have been widely used for grinding and homogenizing charge and aqueous suspensions. However, ceramics do not fully meet the requirements for service life or a number of abrasive bodies. The possibility of synthesizing the  $\text{SrAl}_2\text{O}_3$  payload in the  $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3$  system from a strontium carbonate precursor with different component ratios is shown in the course of experimental studies. In the study of the composite microstructure  $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-3UZrO}_2$ , the presence of ceramic material platelike structures giving ceramics high physical-mechanical (strength, fracture resistance) and wear-resistant characteristics was revealed.

**Keywords:** grinding bodies; ceramic material; aluminum zirconium composite; strength; crack resistance; wear resistance

**For citation:** Highly abrasion resistant composite material / P.M. Pletnev, E.S. Semantseva, S.A. Shahov // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 89-94. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_89

В строительной индустрии и в специальных областях современного материаловедения значительную роль играют процессы измельчения и гомогенизации шихт и водных суспензий. Важно при этом, чтобы применяемое помольное оборудование обеспечивало высокую эффективность измельчения и чистоту получаемого продукта. Низкая степень истираемости, высокая коррозионная стойкость позволяют использовать керамику в качестве мелющих тел и футеровки оборудования. Применение керамики обеспечивает минимальное загрязнение измельчаемого продукта, используемого в строительстве, в том числе лакокрасочные или упрочняющие материалы. Наиболее востребованными для этих целей являются корундовые (алюмооксидные) изделия (мелющие тела и элементы футеровки мельниц). Однако, алюмооксидная керамика не в полной мере удовлетворяет требования по сроку службы и намоту истирающих тел. Решение этой задачи возможно при создании композитной многофазной керамики с определенной структурой, придающую материалу высокую устойчивость к истиранию и механической нагрузки [1-4].

Цель работы: Разработка композитного материала на основе системы  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-3Y-ZrO}_2$  с использованием прекурсора из  $\text{SrZrO}_3$  для изготовления мелющих тел и футеровки.

### Характеристика исходных материалов

В качестве исходных компонентов были использованы: оксид алюминия (глинозем) марки СТ 3000 SG производитель Almatix GmbH (Германия); диоксид циркония, стабилизированный 3,0 мас. % оксида иттрия марки PSZ, производитель Stanford Materials Corporation (США); оксид хрома марки Green "F3" производитель Projector GmbH (Германия, Япония) CAS 1308-38-9; карбонат стронция марки «В» производитель Solvay GmbH (Германия); нестабилизированный диоксид циркония марки CZE-M1 производство Saint-GobainZirPro (Китай). Исходные компоненты характеризовались высокой дисперсностью и чистотой от примесей.



Таблица 1 – Характеристики порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  СТ 3000 SG

| Химический состав              |                  | Размер частиц        |         | Основная фаза            |
|--------------------------------|------------------|----------------------|---------|--------------------------|
| Наименование вещества          | Содержание       | D10                  | 0,2 мкм | Содержание α-фазы 99,83% |
|                                |                  | D50                  | 0,5 мкм |                          |
|                                |                  | D90                  | 2,4 мкм |                          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Не менее 99,772% | Агломераты до 5 мкм. |         |                          |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,092%           |                      |         |                          |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,046%           |                      |         |                          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,021%           |                      |         |                          |
| CaO                            | Не обнаружен     |                      |         |                          |
| MgO                            | 0,069%           |                      |         |                          |

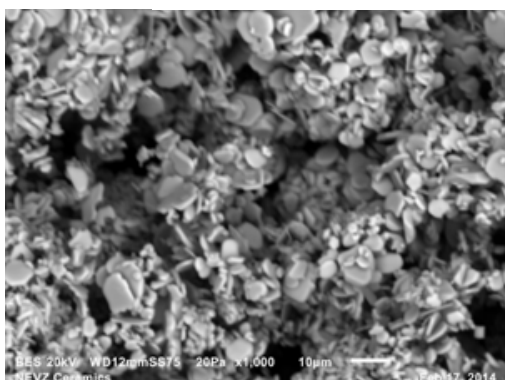


Рисунок 1 – Морфология частиц порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  СТ 3000 SG

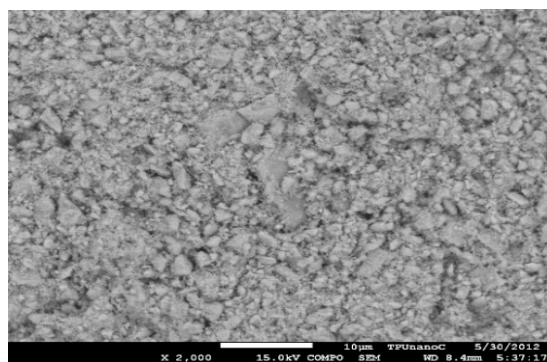


Рисунок 2 – Морфология частиц порошка  $3\text{Y-ZrO}_2$  PSZ

Таблица 2 – Характеристика порошка  $3\text{Y-ZrO}_2$

| Химический состав                  |                     | Размер частиц           |         | Фазовый состав                               |
|------------------------------------|---------------------|-------------------------|---------|----------------------------------------------|
| Наименование вещества              | Содержание          | D10                     | 0,2 мкм | Содержание t-фазы – 63,3%<br>m- фазы – 36,7% |
| ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub> | 94,4%               | D50                     | 0,8 мкм |                                              |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 4,9%                | D90                     | 2,5 мкм |                                              |
| SiO <sub>2</sub>                   | Сумма примесей 0,7% | Агломераты до (6-8) мкм |         |                                              |
| Na <sub>2</sub> O                  |                     |                         |         |                                              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     |                     |                         |         |                                              |
| TiO <sub>2</sub>                   |                     |                         |         |                                              |

Таблица 3 – Характеристика порошка  $\text{Cr}_2\text{O}_3$

| Химический состав       |              | Размер частиц           |         |
|-------------------------|--------------|-------------------------|---------|
| Наименование вещества   | Содержание   | D10                     | 0,2 мкм |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 99,82%       | D50                     | 0,8 мкм |
| $\text{SO}_4$           | не обнаружен | D90                     | 2,5 мкм |
| $\text{ZrO}_2$          | 0,0522 %     | Агломераты до (6-8) мкм |         |
| $\text{Y}_2\text{O}_3$  | 0,0487 %     |                         |         |
| $\text{SrO}$            | 0,0327 %     |                         |         |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0,0204 %     |                         |         |
| Шумовые примеси         | 0,027 %      |                         |         |

Таблица 4 – Характеристика порошка  $\text{SrCO}_3$

| Химический состав     |                | Размер частиц                        |
|-----------------------|----------------|--------------------------------------|
| Наименование вещества | Содержание     | Остаток на менее 45 мкм не более 1%. |
| $\text{SrCO}_3$       | не менее 99,5% |                                      |
| $\text{BaO}$          | не более 1,9 % |                                      |
| $\text{SO}_3$         | не более 0,5 % |                                      |

## Экспериментальная часть

Технология получения композитного керамического материала предусматривала операции: помола, смешения, введение предварительно синтезированных соединений, приготовление пресс-порошка, прессование и спекание образцов. На первом этапе были определены предпочтительные соотношения основных компонентов шихты  $\text{Al}_2\text{O}_3:3\text{Y-ZrO}_2$  и режимы синтеза.

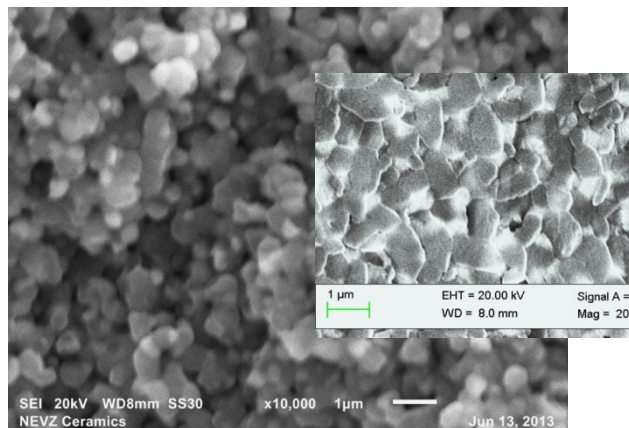


Рисунок 3 – Керамика после спекания в сравнении с керамикой ZTA производства Ceramtec

В табл. 5 - 6 и на рис. 3 приведены физико-механические свойства для разных соотношений компонентов и показана микроструктура алюмоциркониевой керамики при соотношении  $\text{Al}_2\text{O}_3:3\text{Y-ZrO}_2$  как 3:1 и с добавкой оксидов хрома и стронция в качестве прекурсора алюмината стронция.

Таблица 5 – Трещиностойкость керамических образцов с различным соотношением компонентов  $\text{Al}_2\text{O}_3:3\text{Y-ZrO}_2$  в шихте

| Состав керамики                        | 100 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 75 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 25 мас.% 3Y-ZrO <sub>2</sub> | 50 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 50 мас.% 3Y-ZrO <sub>2</sub> | 15 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 85 мас.% 3Y-ZrO <sub>2</sub> | 100 мас.% ZrO <sub>2</sub> |
|----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Трещиностойкость, МПа*м <sup>1/2</sup> | 3,2                               | 4,4                                                             | 4,2                                                             | -                                                               | 5,71                       |

Таблица 6 – Прочность при изгибе ( $\sigma_{\text{изг}}$ ) керамических образцов с различным соотношением компонентов  $\text{Al}_2\text{O}_3:3\text{Y-ZrO}_2$  в шихте

| Состав керамики         | 100 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 75 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 25 мас.% 3Y-ZrO <sub>2</sub> | 50 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 50 мас.% 3Y-ZrO <sub>2</sub> | 15 мас.% $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 85 мас.% 3Y-ZrO <sub>2</sub> | 100 мас.% ZrO <sub>2</sub> |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Прочность на изгиб, МПа | 370±40                            | 780±50                                                          | 870±50                                                          | 850±30                                                          | 700±50                     |

Таблица 7 – Физико-механические характеристики полученного композита

| № серии | Кажущаяся плотность г/см <sup>3</sup> | Относительная плотность, % | Прочность на при статическом изгибе, МПа | Трещиностойкость, МПа*м <sup>1/2</sup> | Микротвердость, ГПа | Износ, мм <sup>3</sup> /млн. циклов |
|---------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 1       | 4,37                                  | 99,32                      | 1193±80                                  | 6,46                                   | 17,0                | 0,3                                 |
| 2       | 4,36                                  | 99,09                      | 1205±80                                  | 6,83                                   | 17,0                | -                                   |
| 3       | 4,37                                  | 99,32                      | 1035±80                                  | 7,12                                   | 17,0                | 0,3                                 |
| 4       | 4,36                                  | 99,09                      | 1264±80                                  | 7,64                                   | 17,3                | -                                   |
| 5       | 4,36                                  | 99,09                      | 1201±80                                  | 6,97                                   | 17,4                | -                                   |

На рис. 4 представлена термо-РФА диаграмма образования алюмината стронция в смеси карбоната стронция и оксида алюминия. Образование гексаалюмината стронция завершается при температуре 1250 °С.

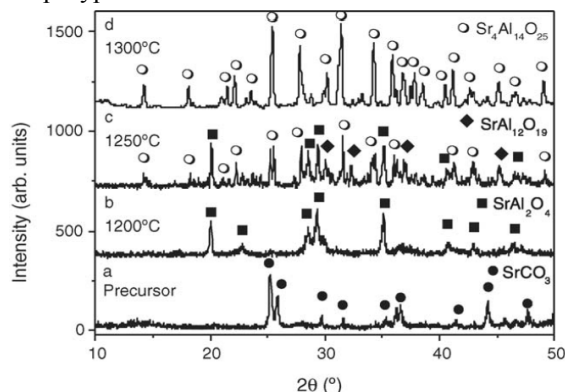


Рисунок 4 – Термо-РФА смеси карбоната стронция и оксида алюминия

Кристаллы гексаалюмината стронция представляют собой пластинки размером: длина 3 мм, ширина 1 мм, которые располагаются равномерно между кристаллами алюмината циркония, тем самым выполняют роль армирующей сетки структуры композита, блокируя эффекта по распространение возникающей трещины (рис. 5).

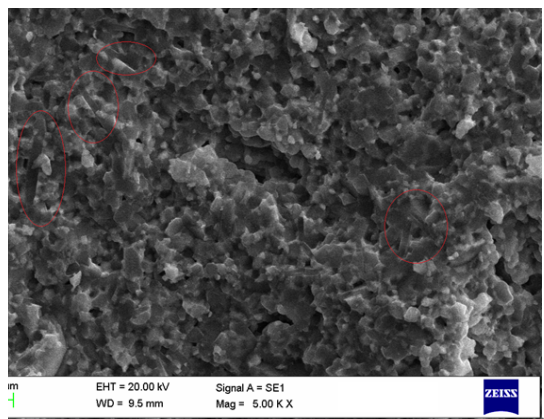


Рисунок 5 – Снимки РЭМ полученной алюмоциркониевой керамики с плателетами  $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$

Модельное представление структуры образующегося композитного материала показано на рис.6.

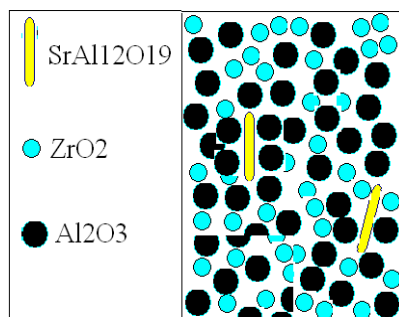


Рисунок 6 – Иллюстрация фрагментарной структуры композитного материала в системе  $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{Y}-\text{ZrO}_2$

Физико-механические характеристики полученного композита приведены в табл. 7 для нескольких последовательно изготовленных партий керамики.

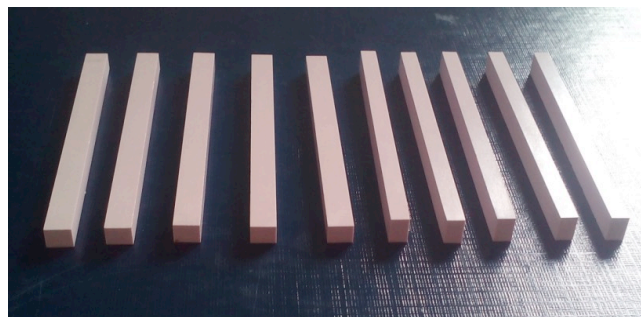


Рисунок 7 – Образцы в виде балочек для испытаний физико-механических характеристик композитного керамического материала

Таким образом, разработан состав композитного керамического материала с высокой устойчивостью к истиранию на основе высокочистых и высокодисперсных исходных материалов для системы  $\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{Y}-\text{ZrO}_2$  с формированием фрагментарной структуры алюмоциркониевой керамики, армированной плателетами пластинчатой формы гексаалюминатов стронция. Это придает керамике высокие физико-механические (прочность, трещиностойкость) и износостойкие характеристики.

#### Выводы

1. Синтезирован композитный керамический материал системы  $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{SrO}-\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{Y}-\text{ZrO}_2$  с образованием структур  $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$  за счет введения прекурсора  $\text{SrZrO}_3$ , имеющий высокие физико-механические характеристики (трещиностойкость и прочность на изгиб).
2. Установлено, что валуоциркониевом композите образуются плателеты-кристаллы состава  $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$  при введении  $\text{SrZrO}_3$  в композит. При этом не обнаружено областей конгломерации плателет.
3. Показано, что содержание диоксида циркония, частично стабилизированного 3,0 мас. % оксида иттрия – 25 %, является оптимальным для выбранной керамической композиции  $\text{Al}_2\text{O}_3-3\text{Y}-\text{ZrO}_2$ .

#### Библиографический список

1. Марков, М. А. Износостойкие керамические материалы на основе оксида алюминия для пар трения : специальность 05.17.11 "Технология



- силикатных и тугоплавких неметаллических материалов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Марков Михаил Александрович. – Санкт-Петербург, 2016. – 22 с. – EDN ZQICAD.
2. Семанцова, Е. С. Композитная керамика для специального применения / Е. С. Семанцова, П. М. Плетнев, И. В. Шемякина // ПОВЫШЕНИЕ качества и эффективности строительных и специальных материалов : Сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием, Новосибирск, 18–22 февраля 2019 года. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2019. – С. 278-282. – EDN VTXDUF.
4. Callaghan J.J. Ceramic on crosslinked polyethylene in total hip replacement: any better than metal on crosslinked polyethylene // Iowa Orthop. J. – 2009 – Vol. 29 – P. 1-4
5. Семченко, Г.Д. Конструкционная керамика и огнеупоры / Г.Д. Семченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 324 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 01.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья  
УДК 691.168  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_95

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИКАЦИИ БИТУМА НАНОДОБАВКАМИ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ НА СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКАХ<sup>1</sup>

© Авторы 2023  
SPIN-код: 6471-3980

**ПРИБЫЛОВ Вячеслав Сергеевич**  
аспирант  
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (Россия, Новосибирск)*

SPIN: 6626-3274

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

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы улучшения качества асфальтовых бетонов за счет введения наноразмерных частиц – углеродных нанотрубок. Показано, что рациональное их введение в битумное вяжущее обеспечивает повышение адгезии к шлаковому заполнителю, что приводит к увеличению прочности и других эксплуатационных характеристик асфальтового бетона.

**Ключевые слова:** сталеплавильные шлаки; битумное вяжущее; нанодобавки; строительные материалы; термомеханические свойства; микроструктура

**Для цитирования:** Прибылов В.С., Пичугин А.П. Эффективность модификации битума нанодобавками в асфальтобетоне на сталеплавильных шлаках // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 95-100. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_95

Original article

## EFFICIENCY OF BITUMEN MODIFICATION BY NANOADDITIVES IN ASPHALT CONCRETE ON STEELMAKING SLAGS

© The Author(s) 2023

**PRIBYLOV Vyacheslav Sergeevich**  
PhD Candidate  
*Novosibirsk state University of architecture and civil engineering (Russia, Novosibirsk)*

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

**Abstract.** The issues of improving the quality of asphalt concrete due to the introduction of nanoscale particles, such as carbon nanotubes, are considered. It is shown that their rational introduction into the bitumen binder provides an increase

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



in adhesion to the slag aggregate, which leads to an increase in the strength and other performance characteristics of asphalt concrete.

**Keywords:** steelmaking slags; bituminous binder; nanoadditives; thermomechanical properties; microstructure

**For citation:** Pribylov V.S., Pichugin A.P. Efficiency of bitumen modification by nanoadditives in asphalt concrete on steelmaking slags // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 95-100. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_95

## Введение

Асфальтовый бетон в процессе работы в дорожных покрытиях подвергается воздействию комплекса атмосферных факторов и во времени изменяет свои свойства. Существенным недостатком асфальтобетона на основе битума является его старение, сопровождающееся ухудшением деформативных свойств асфальтобетонных покрытий и приводящее к значительному сокращению срока службы [1-3]. Особый интерес здесь представляет скорость изменения свойств битумоминеральных и асфальтобетонных покрытий за счет старения органических вяжущих, так как по мере увеличения срока эксплуатации дорог снижаются упруго-вязкопластические деформации, материал становится более хрупким [3].

Данная проблема является актуальной и для асфальтобетонных смесей, приготовленных с применением вторичных отходов промышленного производства – сталеплавильных шлаках. Несмотря на положительные характеристики асфальтового бетона на шлаковых материалах, некоторыми авторами [4] отмечается негативное влияние пористости шлакового щебня на эксплуатационные свойства асфальтобетона. Выборочная диффузия летучих фракций битума в минеральный материал приводит к его старению в дорожном покрытии.

Регулировать процессы старения битума в том числе и в шлакоасфальтобетоне можно использованием более термостабильных вяжущих. Использование модификаторов в дорожном строительстве решает проблемы повышения термостабильности асфальтобетона, экономии битума, утилизации отходов, а также связанных с ними экологических проблем и охраны окружающей среды. Механизм модифицирующего воздействия добавок на дорожный битум, в составе асфальтобетонной смеси, заключается в его структурировании. При повышении степени наполнения массы вяжущего дисперсной фазой когезионная прочность и плотность композиции возрастает.

В последние годы активно проводятся работы по использованию нанотехнологий в производстве строительных материалов. Наноматериалы могут выполнять роль адсорбентов, катализаторов и модификаторов химических реакций, технологических и конструктивных свойств изготавливаемых с их применением материалов. Анализ состояния и тенденций развития объектов наноиндустрии в настоящее время позволяет сделать вывод о том, что одной из наиболее перспективных областей нанотехнологий является применение углеродных наноматериалов (далее – УНМ) [5].

*Материалы и методы исследования*

С целью повышения долговечности и качества битумных вяжущих материалов проведены исследования по введению в их состав различного рода добавок УНМ, позволяющих улучшить присущие битумам свойства и модифицировать их в необходимом направлении.

Действие модифицирующих нанодобавок можно представить в виде компонентов, обеспечивающих каталитический эффект, проявляемый эффективно в случае максимальной адгезии как к введенным наночастицам, так и когезии самого битума, т.е. чем выше адгезия тел, тем будет выше сопротивляемость системы к воздействующим факторам. Особенно это заметно на показателях растяжимости битумной композиции в присутствии нанодобавок (см. рис.1) [6-14].

Представленные результаты испытания модифицированных составов битумного вяжущего с добавками различных наноразмерных частиц подтверждают вышесказанное и свидетельствуют о существенном влиянии нанодобавок на свойства битумной композиции.

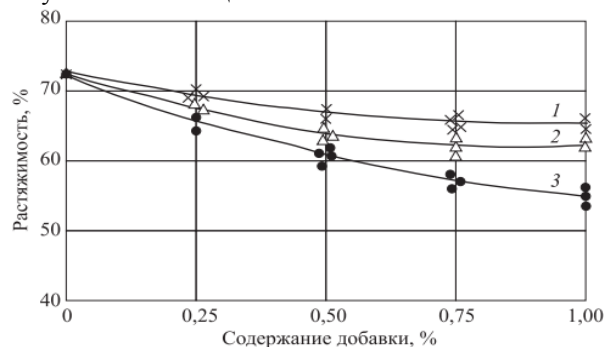


Рис. 1. Влияние нанодобавок на растяжимость битума: 1 – оксид алюминия, гидроксид магния; 2 – оксид цинка, диоксид кремния; 3 – углеродные нанотрубки

Интерес здесь вызывает выяснение влияния нанодобавок в присутствии минерального наполнителя из сталеплавильных шлаков. С этой целью был выполнен комплекс термомеханических исследований, которые также явились подтверждением показателей физико-механических испытаний модифицированного нанодобавками битумного вяжущего.

Наибольшее усиление, проявляемое в снижении деформации и увеличении температурного перехода – температуры текучести – отмечено при введении углеродных нанотрубок [6-14].

Углеродные нанотрубки (далее – УНТ) являются эффективным средством повышения прочностных свойств композитных полимерных материалов. Введенные в асфальтобетонную смесь

нанотрубки ее армируют, превращая в композиционный материал. Нанотрубки ведут себя как «зародыши» кристаллов, но поскольку они имеют не точечную, а протяженную форму, кристаллы образуются вытянутые. Разрастаясь, кристаллы переплетаются, частично прорастают друг в друга и образуют пространственную сеть, пронизывающую и связывающую в единое целое всю асфальтобетонную смесь [15].

На рис. 2 приведены термомеханические кривые затвердевшего битумного связующего на тонкомолотом наполнителе из сталеплавильного шлака с различным процентным содержанием УНТ.

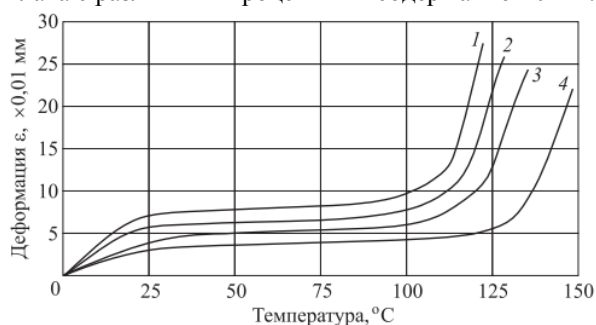


Рис. 2. Термомеханические кривые модифицированного битумного вяжущего с различным содержанием углеродных нанотрубок: 1 - без добавок; 2 - УНТ 0,01%; 3 - УНТ 0,10 %; 4 - УНТ 0,05%

Использование шлаковых заполнителей имеет некоторые особенности по сравнению с плотными каменными породами выражающиеся в увеличенном объеме открытой пористой структуры наполнителя. Этот факт напрямую связан с повышением адгезии битумного вяжущего к шлаковому заполнителю и упрочнению зоны контакта за счет вхождения битума в пористую структуру минерального компонента. При этом следует отметить, что взаимодействие носит в большей степени механический характер, а не физико-химический, о чем свидетельствует кривая 1 на рис.2 точно повторяющая свойства битумно-шлаковой композиции без нанодобавок. Введение наноразмерных частиц способствует формированию надмолекулярных структур битумной композиции в виде пространственной структуры, что сказывается на деформативных показателях, которые снижаются в два-три раза. Также значительно увеличивается термостабильность полученных смесей – на 20-25°C, что может характеризовать данные смеси как более упорядоченные за счет появления активных центров из наноразмерных частиц. При этом за счет обеспечения прочного адгезионного контакта молекулы битума взаимодействуют со шлаком не изолированно, а в комплексной упрочненной структуре.

Выше уже было указано, что повышенное количество центров кристаллизации в смеси, с которыми выступают наноразмерные частицы,

может приводить к снижению качества прочных химических связей. Как следует из рис.2 кривая 4 отвечает рациональному расходу нанодобавки УНТ, в то время как кривая 3 с большим расходом нанодобавки приводит к обратному эффекту, снижая качественные показатели композитного материала как по деформативным показателям, так и по термостабильности. Таким образом, оптимальное число связываемых молекул в пределах 600-800 молекул из состава вяжущего является оптимальным [11-17].

Изучение микроструктуры позволило осуществить сравнение структурных превращений на этапах формирования конгломератного материала при изменениях рецептов, связанных с различием дозировки нанодобавок. На рис. 3.1 представлены фрагменты микроструктуры асфальтового бетона без наноразмерных добавок. Отмечена рыхлая неупорядоченная структура, создание которой не отличается равномерно распределенными фазами присущими для эффективной макроструктуры. Наблюдаются некоторые неравномерности практически по всему полю видимости микроскопа.

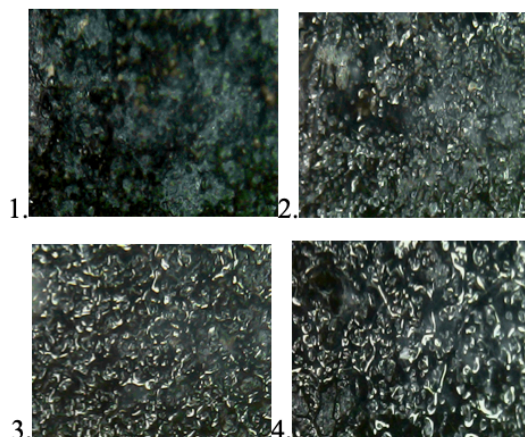


Рис. 3 Микроструктура асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках, х1000:

1 – без нанодобавок; 2 – добавка УНТ 0,01%;  
3 – добавка УНТ 0,05%; 4 – добавка УНТ 0,10%

Введение добавки углеродных нанотрубок в количестве 0,01% (рис. 3.2) способствует появлению микроцентров кристаллизации и формированию микроструктуры с большей степенью упорядоченности по сравнению с бездобавочным вариантом (рис. 3.1). В целом данная микроструктура выравнивается за счет формирования распределенных по всему полю микроцентров, обеспечивающих четкость и упорядоченность материала.

Еще более упорядоченной выглядит микроструктура битумно-минерального вяжущего с добавкой 0,05% углеродных нанотрубок (рис. 3.3). Данный состав отличается равномерно распределенными центрами кристаллизации, которые присутствуют в достаточном объеме для формирования прочной взаимосвязи между



битумным вяжущим и минеральным заполнителем. Данное положение хорошо согласуется с результатами фотоэлектроколориметрических исследований [16-17], показавших, что данный состав обладает повышенной адгезионной прочностью, которая и образовалась благодаря активному взаимодействию компонентов с равномерным распределением центров кристаллизации углеродных нанотрубок.

При дальнейшем увеличении дозировки нанодобавки УНТ отмечены нарушения структуры и упорядоченности распределения центров кристаллизации (рис. 3.4), что вызвано избытком активных частиц, способных обеспечить взаимодействие с фрагментами битумного вяжущего. В результате переизбытка активных частиц наступает нарушение упорядоченности, что приводит к ухудшению физико-механических показателей. Данное положение подтверждается неравномерностью микроструктурных образований и, как следствие, приводит к снижению адгезионной прочности модифицированного битумного вяжущего. Приведенные выводы хорошо согласуются с результатами термомеханических и физико-механических исследований, что было описано ранее.

С целью увеличения срока службы асфальтового покрытия на сталеплавильных шлаках (далее – СПШ) проведены исследования по изучению влияния наноразмерных добавок, вводимых в битумное вяжущее, на эксплуатационные характеристики асфальтового бетона.

На рис. 4 представлены результаты испытаний на морозостойкость асфальтобетона на СПШ с добавками в сравнении с традиционными композициями.

Анализ полученных кривых свидетельствует о неизбежном снижении прочностных характеристик асфальтобетона на СПШ, однако, степень деградации физико-механических свойств асфальтобетона в целом и битумного вяжущего в частности для асфальтобетона на СПШ на 15-20% ниже, чем у традиционных асфальтобетонных смесей. Ещё более заметна эта разница для составов с добавкой углеродных нанотрубок. Так, после 50 циклов попеременного замораживания и оттаивания потеря прочности наномодифицированных составов не превышает 1 - 12 %, в то время как традиционные составы теряют до 25%.

Ещё большие различия отмечены после проведения 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Для асфальтобетона на СПШ с нанодобавками потеря прочности составила 15-17%, в то время как составы без нанодобавок снизили прочностные показатели на 34-37%, а традиционный асфальт потерял более 55% своих прочностных свойств. Таким образом, можно сделать вывод о том, что введение наноразмерных частиц УНТ способствует усилению сопротивляемости асфальтобетона климатическим воздействиям и, следовательно, может считаться более долговечным по сравнению с традиционными асфальтобетонами.

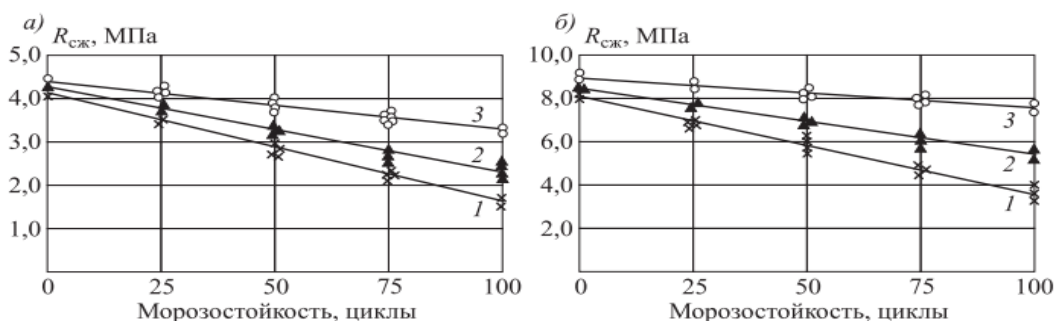


Рис. 4. Изменение предела прочности при сжатии асфальтобетона на сталеплавильных шлаках с нанодобавками в сравнении с традиционным асфальтобетоном после замораживания и оттаивания (А – при 20°С; Б – при 0°С):  
1 – традиционный асфальтобетон; 2 – асфальтобетон на СПШ без добавок;  
3 – то же, с нанодобавкой УНТ (0,05%)

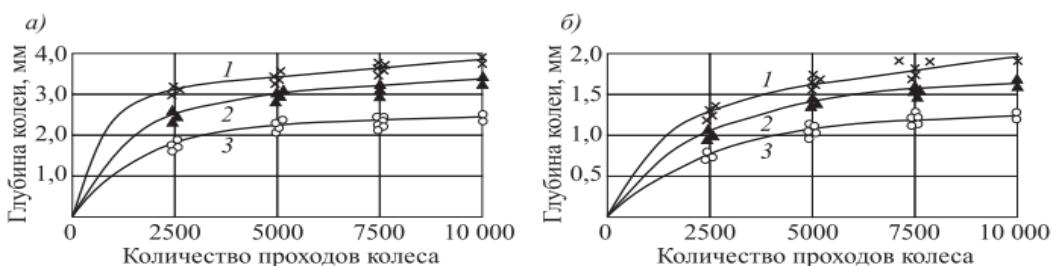


Рис. 5. Кривые зависимости колееобразования асфальтобетона на сталеплавильных шлаках при положительной (А) и отрицательной (Б) температурах:  
1 – традиционный состав асфальтобетона; 2 – асфальтобетон на сталеплавильных шлаках;  
3 – то же, с нанодобавкой УНТ



Важнейшей эксплуатационной характеристикой асфальтобетона является колееобразование, величина которого зависит от плотности как самого заполнителя, так и от степени его уплотнения при устройстве асфальтового покрытия.

Известно, что сталеплавильные шлаки обладают повышенной прочностью в силу своего химического состава, поэтому величина колееобразования таких покрытий несколько ниже, чем у традиционных составов. С целью фактического определения величины колееобразования асфальтобетона на СППШ с нанодобавками были проведены испытания на специальном стенде, имитирующем прохождение колеса автомобиля с шипами, а также выполнены опытные участки дорожного покрытия, которые также подвергались систематическим наблюдениям и испытаниям.

На рис. 5 представлены результаты испытаний асфальтового бетона на СППШ на колееобразование [17].

Анализируя полученные зависимости сопротивляемости асфальтового покрытия воздействию нагрузкам, можно сделать следующие выводы [17-20]. Вне зависимости от вида асфальтового покрытия все материалы в той или иной степени подвержены колееобразованию. Так, в теплое время года величина колеи после прохода 5000 колес составляет не менее 3,3-3,7 мм для традиционных составов и около 3,0 мм для композитов на СППШ без добавок. При введении 0,05% УНТ отмечено снижение колееобразованию в полтора-два раза. Ещё большее различие отмечено при воздействии на образцы прохода 10000 колес: составы асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках с нанодобавкой замедляют колееобразование, что объясняется более упрочненной структурой по сравнению с традиционными и бездобавочными композитами. Аналогичные результаты отмечены и при проведении испытаний в условиях воздействия отрицательных температур. Так, составы с нанодобавкой УНТ имеют минимальные потери массы асфальтобетона и, следовательно, обладают меньшим показателем колееобразования по сравнению с традиционными.

#### Выводы

Использование нанодобавок совместно со сталеплавильными шлаками в асфальтовых смесях дает положительный эффект по сравнению с традиционными составами. Отмечено повышение транспортно-эксплуатационных и строительно-технических характеристик шлакоасфальтобетона:

- увеличение морозостойкости на 25-35%;
- стабилизация длительной прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии;
- снижение колееобразования почти в два раза.

Кроме того, введение УНТ способствует повышению адгезионных сил в контактной зоне

между минеральным шлаковым заполнителем и битумным вяжущим. Дополнительным положительным фактором является упрочнение битумного вяжущего в асфальтобетоне со стабилизацией первоначальных свойств, что подтверждается физико-химическими методами исследований. Такой результат достигается за счет проявления активности наночастиц, являющихся центрами кристаллизации в битумном вяжущем, способствующим упрочнению всей структуры асфальтобетона на СППШ.

#### Библиографический список

1. Ерофеев, В. Т. Дорожные битумо-минеральные материалы на основе модифицированных битумов (технология, свойства, долговечность) / В. Т. Ерофеев, Ю. М. Баженов, Ю. И. Калгин ; Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева; Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2009. – 276 с. – ISBN 978-5-7103-2184-3. – EDN RTAGEX.
2. Ерофеев, В. Т. Каркасные строительные композиты : специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ерофеев Владимир Трофимович. – Москва, 1993. – 51 с. – EDN ZJHEOZ.
3. Баженов, Ю. М. Нанотехнология и наномодифицирование в строительном материаловедении. Зарубежный и отечественный опыт / Ю. М. Баженов, Е. В. Королев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2007. – № 2. – С. 17-22. – EDN OLQAAX.
4. Расстегаева, Г.А. Исследование процессов структурообразования смеси из гранулированного доменного шлака и вязкого битума при строительстве покрытий автомобильных дорог: автореф. дис. канд. техн. наук / Г.А. Расстегаева. – Л-д, 1970. – 24 с.
5. Тенденции развития наномодификации композитов на органических вяжущих в дорожно-строительной отрасли / М. А. Высоцкая, Д. А. Кузнецов, С. Ю. Русина [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 17-20. – EDN RPIPHB.



6. Пичугин, А. П. Модификации битума нанодобавками для асфальтобетона на сталеплавильных шлаках / А. П. Пичугин, В. С. Прибылов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 1(769). – С. 50-60. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-769-1-50-60. – EDN ZRTWVI.
7. Усов Б.А., Горбунова Т.Н. Свойства и модификация битумных вяжущих// Системные технологии. – 2017. - №22. – С.72-88.
8. Самодуров С.И. Дорожный шлаковый асфальтовый бетон: диссертация ... доктора технических наук: 05.23.05. - Воронеж, 1982. - 388 с.
9. Шестаков Н.И., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л. и др. Асфальтобетон с использованием углеродных наномодификаторов // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. - 2015. - № 6. - С.21-30.
10. Беляев К.В., Чулкова И.Л. Модификация битума техническим углеродом // Вестник СибАДИ — 2019. – 16(4). – С. 477-484.
11. Влияние наноразмерных добавок на адгезионную способность защитных полимерных покрытий / А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, В. В. Банул, А. Ю. Кудряшов // Строительные материалы. – 2018. – № 1-2. – С. 39-44. – EDN YRQXUK.
12. Роль нанодобавок в формировании прочного контактного слоя защитных покрытий / А. В. Пчельников, А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, О. Е. Смирнова // Строительные материалы. – 2022. – № 7. – С. 45-50. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-804-7-45-50. – EDN BCJOSY.
13. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел: монография [Текст] - М. Наука 1973. - 280 с.
14. Каргин В.А. Роль структурных явлений в формировании свойств полимеров. [Текст] / В.А.Каргин - М., 1969. – С.7-31.
15. Запороцкова И.В. Углеродные наноматериалы для дорожного строительства. - Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2009. – 469 с.
16. Прибылов, В. С. Повышение адгезии битума в асфальтобетоне на сталеплавильных шлаках модификацией нанодобавками / В. С. Прибылов, А. П. Пичугин, А. С. Денисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 2(770). – С. 16-24. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-770-2-16-24. – EDN VXKKUG.
17. Прибылов, В. С. Долговечность асфальтобетона на сталеплавильных шлаках с модифицированным нанодобавками битумом / В. С. Прибылов, А. П. Пичугин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 4(772). – С. 14-23. – DOI 10.32683/0536-1052-2023-772-4-14-23. – EDN CDUCAG.
18. Котлярский Э.В. Морозостойкость асфальтобетона // Строительные материалы. – 2011. - №5. - С.81-83.
19. Руденский А.В., Никонова О.Н., Казиев М.Г. Повышение долговечности асфальтобетонов введением активного комплексного модификатора// Строительные материалы. - 2011. - № 10. - С.10-11.
20. Корочкин А.В. Износ жестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием // Строительные материалы, - 2012. - №3. - С.66-67.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 23.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья

УДК 69.059

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

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

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_101

## НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© Авторы 2023

SPIN: 9629-5322

AuthorID: 420903

ORCID 0000-0003-0209-7726

**РИМШИН Владимир Иванович**

член-корреспондент РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор

*Научно-исследовательский институт строительной физики  
РААСН (НИИСФ РААСН);*

*Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет*

*(Россия, Москва, e-mail: v.rimshin@niisf.ru)*

SPIN: 3821-9431

**СОЛОВЬЕВ Алексей Кириллович**

доктор технических наук, профессор

*Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет*

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

SPIN: 7156-3920

AuthorID: 445219

ORCID 0000-0002-1180-558X

**СУЛЕЙМАНОВА Людмила Александровна**

доктор технических наук, профессор

*Белгородский государственный технологический университет  
имени Владимира Григорьевича Шухова*

*(Россия, Белгород, e-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru)*

SPIN: 8237-9002

AuthorID: 1144529

ORCID 0000-0002-7104-3214

**АМЕЛИН Павел Андреевич**

аспирант

*Белгородский государственный технологический университет  
имени Владимира Григорьевича Шухова*

*(Россия, Белгород, e-mail: p.amelin@inbox.ru)*

**Аннотация.** В статье изучен нейросетевой метод прогнозирования физико-механических характеристик полимеркомпозитных текстильных материалов, предназначенных для усиления строительных конструкций. Для этого был использован программный комплекс STATISTICA Neural Networks, данные для обучения, тестирования и верификации были получены от производителей составных материалов, таких как Юматекс Росатом (Россия), Sika (Швейцария), S&P (США), BASF (Германия), НИИ «ИНТЕР/ТЭК» (Россия) и FYFE (США). Входными переменными для обучения нейросети были прочность волокна на растяжение  $R_b$ , модуль упругости волокна  $E_b$ , прочность клея на растяжение (сдвиг)  $R_m$ , поверхностная плотность волокна  $\rho_{\text{пов}}$ , толщина холста  $t$ , относительное удлинение волокна при разрыве  $\delta$ . Выходными переменными были прочность на растяжение  $R_f$  и модуль упругости  $E_f$  углеродной ламели. Алгоритм BGFS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) был использован для обучения нейронной сети. Архитектура нейронной сети включала многослойный перцептрон с одним промежуточным слоем, содержащим от 1 до 20 нейронов. Обучение проходило в течение 1000 циклов. Для верификации нейросетевого прогнозирования были проведены испытания на осевое растяжение трех образцов углеродной ламели размерами 300x20 мм, состоящих из волокон SikaWrap 230C и двухкомпонентной эпоксидной матрицы FibArm Resin 230+. В результате прогнозирования нейросетью были получены средние значения прочности на растяжение и модуля упругости для испытанных ламелей.



Максимальное отклонение между результатами нейросетевого прогнозирования и фактическими испытаниями составило 3,5%.

**Ключевые слова:** усиление строительных конструкций; композитные материалы на основе углеродных волокон; искусственные нейронные сети; прогнозирование; прочность на осевое растяжение; модуль упругости

**Для цитирования:** Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций / Римшин В.И., Соловьев А.К., Сулейманова Л.А., Амелин П.А. // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 101-107. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_101

Original article

## NEURAL NETWORK PREDICTION OF PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS USED FOR STRENGTHENING BUILDING STRUCTURES

© The authors 2023

**RIMSHIN Vladimir Ivanovich**

Corresponding Member of RAACS, Honored Builder of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof.  
*Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences;*  
*National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, Moscow, e-mail: v.rimshin@niisf.ru)*

**SOLOVIEV Alexey Kirillovich**

Dr. of Technical, Prof.  
*National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, Moscow, e-mail: kafedraarxitekktury@yandex.ru)*

**SULEYMANOVA Lyudmila Aleksandrovna**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
*Belgorod State Technological University named after Vladimir Grigoryevich Shukhov (Russia, Belgorod)*

**AMELIN Pavel Andreevich**

PhD Candidate  
*Belgorod State Technological University named after Vladimir Grigoryevich Shukhov (Russia, Belgorod, e-mail: p.amelin@inbox.ru)*

**Abstract.** The article studies the neural network method of forecasting the physical and mechanical characteristics of polymer-microposite textile materials designed to strengthen building structures. The software package "STATISTICA Neural Networks" was used for this purpose. Data for training, testing and verification were obtained from manufacturers of composite materials such as Yumatex Rosatom (Russia), Sika (Switzerland), S&P (USA), BASF (Germany), Research Institute «INTER/TEQ» (Russia) and FYFE (USA). Input variables for learning the neural network were  $R_b$  tensile strength fiber,  $E_b$  fiber elasticity module,  $R_m$  tensile strength adhesive (shear),  $\rho_p$  surface density fiber, the thickness of the canvas  $t$ , and the relative elongation of the fiber at the rupture  $\delta$ . The output variables were the tensile strength  $R_f$  and the elastic modulus  $E_f$  carbon laminate. The BGFS algorithm (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) was used for neural network training. The architecture of the neural network included a multi-layered perceptron, with one intermediate layer containing 1 to 20 neurons. Training was provided over 1,000 times. In order to verify the neural network prediction, tests were conducted on the axial tensioning of three samples of carbon lamellas measuring 300x20 mm, consisting of SikaWrap 230C fibers and the two-component epoxy matrix FibArm Resin 230+. As a result of the prediction, the neural network obtained average tensile strength values and a modulus of elasticity for the tested lamellas. The maximum deviation between neural network predictions and actual testing was 3.5%.

**Keywords:** strengthening of building structures; carbon fibre-based composite materials; artificial neural networks; forecasting; axial tensile strength; elastic modulus

**For citation:** Experimental studies of bent reinforced concrete elements with reinforcement damage due to contact with an aggressive chloride environment / Rimshin V.I., Soloviev A.K., Suleymanova L.A., Amelin P.A. // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 101-107. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_101

### Введение

Практика усиления строительных конструкций зданий и сооружений связана с необходимостью восстановить или увеличить исходную несущую способность элемента. Альтернативой классическим методам усиления конструкций стало применение полимеркомпозитных текстильных материалов, состоящих из высокомодульных волокон и полимерной матрицы. В качестве волокон используются такие материалы, как стекло-, угле-, органо-, боропластики. Среди них, наиболее используемыми при усилении считаются углепластики, благодаря ряду преимуществ, таких как высокая прочность на растяжение, высокий модуль упругости, устойчивость к воздействию агрессивных сред, а также высокий коэффициент длительной прочности. В основе матрицы используются адгезивные эпоксидные, винил и полиэфирные составы.

Для достижения прочностных характеристик изделия рекомендуется использовать волокна и адгезивные полимерные составы одного производителя. Однако, в практике строительства нередко комбинируются компоненты различных производителей, что ставит задачу прогнозирования физико-механических свойств конечного изделия.

Наряду с традиционными методами прогнозирования сегодня бурно развивается теория искусственных нейронных сетей. Искусственные нейронные сети имитируют работу биологических нейронов в мозге и состоят из множества связанных между собой узлов (нейронов), которые обрабатывают входные данные и выдают выходные данные. Каждый нейрон соединен с другими нейронами через веса, которые определяют важность каждого входного сигнала. Нейросети обучаются находить связи и закономерности в данных путем изменения весов связей между нейронами. Следует отметить, что вопросы изучения повреждений строительных конструкций и рекомендации по их усилению изучались и были отмечены в российской технической литературе [1-22], а также в зарубежных источниках [23-25].

Состав нейронной сети может варьироваться, но в общем случае нейронная сеть состоит из трех типов слоев (рис. 1):

- входной слой, который получает входные данные и передает их в следующий слой нейронной сети. Количество нейронов в этом слое соответствует количеству входных параметров.

- скрытые слои, которые обрабатывают данные между входным и выходным слоем нейронной сети. Количество скрытых слоев и количество нейронов в каждом слое зависит от конкретной задачи и может быть разным.

- выходной слой, который выдает результат работы нейронной сети. Количество нейронов в этом слое зависит от типа задачи.

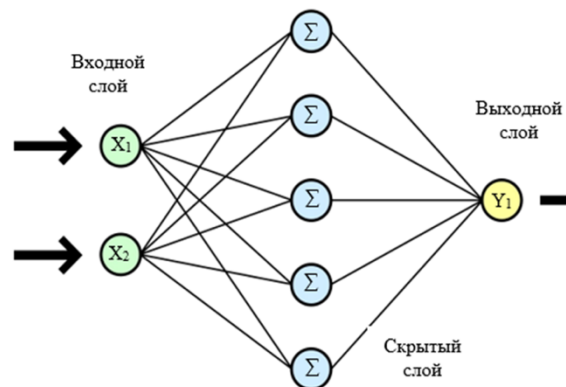


Рис. 1. Состав простейшей нейросети.

Нейросетевой подход, в отличие от традиционных методов, основанных на предположениях и ограничениях, законах распределения, подходит как для линейных, так и для сложных нелинейных зависимостей. Данный метод эффективен при обосновании зависимостей между множественными переменными.

Программный комплекс STATISTICA Neural Networks является основным инструментом для проведения прогнозных нейросетевых исследований. Он предоставляет широкий набор аналитических средств, позволяющих проводить исследования с использованием различных методов прогнозирования. STATISTICA Neural Networks позволяет проводить исследования с применением практически всех известных методов прогнозирования. Это включает в себя не только нейросетевое прогнозирование, но и другие методы, такие как регрессионный анализ, временные ряды, генетические алгоритмы и многое другое.

### Методы исследования

В рамках исследования был проведен нейросетевой регрессионный прогноз физико-механических характеристик композитных тканевых материалов на основе углеродных волокон из компонентов различных производителей, например, таких как Юматекс Росатом (Россия), Sika (Швейцария), S&P (США), BASF (Германия), НИИ «ИНТЕР/ТЭК» (Россия), FYFE (США), Torayca (Япония), а также в программном комплексе STATISTICA Neural Networks, полученных по результатам исследований.

В качестве входного слоя для обучения нейросети использовались независимые переменные – прочность волокна на растяжение  $R_v$ , модуль упругости волокна  $E_v$ , прочность клея на растяжение



Таблица 1. Данные физико-механических характеристик материалов

| Тип ткани                             | Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup> | Толщина ленты, мм | Модуль упругости, ГПа<br>(волокна) | Прочность на растяжение, ГПа<br>(волокна) | Среднее значение модуля упругости, ГПа (лента) | Среднее значение прочности на растяжение, ГПа (лента) | Относительное удлинение углепластика при разрыве, % | Прочность клея на растяжение (сдвиг), ГПа | Наименование клея                      |
|---------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| FibARM Tape 200/300                   | 200                                       | 0,111             | 245                                | 4,3                                       | 245                                            | 3,6                                                   | 1,8                                                 | 0,016                                     | FibArm Resin 230+                      |
| FibARM Tape 230/300                   | 230                                       | 0,128             | 245                                | 4,3                                       | 245                                            | 3,6                                                   | 1,8                                                 | 0,016                                     | FibArm Resin 230+                      |
| FibARM Tape 300/300                   | 300                                       | 0,167             | 245                                | 4,3                                       | 245                                            | 3,6                                                   | 1,8                                                 | 0,016                                     | FibArm Resin 230+                      |
| FibARM Tape 350/300                   | 350                                       | 0,194             | 245                                | 4,3                                       | 245                                            | 3,6                                                   | 1,8                                                 | 0,01                                      | FibArm Resin 530+                      |
| FibARM Tape 530/300                   | 530                                       | 0,294             | 245                                | 4,3                                       | 245                                            | 3,6                                                   | 1,8                                                 | 0,01                                      | FibArm Resin 530+                      |
| SikaWrap 230 C                        | 235                                       | 0,129             | 230                                | 4                                         | 225                                            | 3,5                                                   | 1,7                                                 | 0,03                                      | Sikadur 330                            |
| SikaWrap 530 C                        | 528                                       | 0,29              | 230                                | 4                                         | 225                                            | 3,5                                                   | 1,7                                                 | 0,03                                      | Sikadur 330                            |
| S&P C Sheet 240 200g/m <sup>2</sup>   | 230                                       | 0,117             | 240                                | 4,4                                       | 240                                            | 3,8                                                   | 1,8                                                 | 0,014                                     | S&P Resin 55 HP                        |
| S&P C Sheet 240 300g/m <sup>3</sup>   | 330                                       | 0,117             | 265                                | 5,1                                       | 265                                            | 3,8                                                   | 1,8                                                 | 0,014                                     | S&P Resin 55 HP                        |
| S&P C Sheet 240 400g/m <sup>4</sup>   | 430                                       | 0,117             | 265                                | 5,1                                       | 265                                            | 3,8                                                   | 1,8                                                 | 0,014                                     | S&P Resin 55 HP                        |
| S&P C Sheet 240 600g/m <sup>5</sup>   | 630                                       | 0,117             | 265                                | 5,1                                       | 265                                            | 3,8                                                   | 1,8                                                 | 0,014                                     | S&P Resin 55 HP                        |
| S&P C Sheet 640                       | 430                                       | 0,19              | 640                                | 2,6                                       | 640                                            | 2,65                                                  | 1,8                                                 | 0,014                                     | S&P Resin 55 HP                        |
| Mbrace Fib CF 230/4900/300g           | 300                                       | 0,167             | 230                                | 4,9                                       | 257                                            | 3,174                                                 | 1,8                                                 | 0,016                                     | Mbrace Saturant                        |
| Mbrace Fib CF 230/4900.530g           | 530                                       | 0,294             | 230                                | 4,9                                       | 236                                            | 3,334                                                 | 1,8                                                 | 0,016                                     | Mbrace Saturant                        |
| Mbrace Tow Sheet                      | 300                                       | 0,165             | 380                                | 4,9                                       | 380                                            | 3                                                     | 1,8                                                 | 0,016                                     | Mbrace Saturant                        |
| Торакса UT70-20                       | 200                                       | 0,111             | 235                                | 4,6                                       | 230                                            | 3,4                                                   | 1,7                                                 | 0,01                                      | TSR800S                                |
| Торакса UT70-30                       | 300                                       | 0,167             | 235                                | 4,6                                       | 230                                            | 3,4                                                   | 1,7                                                 | 0,01                                      | TSR800S                                |
| Торакса UM46                          | 300                                       | 0,163             | 445                                | 4,9                                       | 440                                            | 2,4                                                   | 1,7                                                 | 0,01                                      | TSR800S                                |
| ITECWRAP® CF1-012-610-050-230-379-170 | 230                                       | 0,127             | 230                                | 4,5                                       | 230                                            | 3,79                                                  | 1,7                                                 | 0,0206                                    | ITECRESIN® AS2-310-020-017-640-041-051 |
| Tyfo SCH-41                           | 644                                       | 0,417             | 250                                | 4,3                                       | 227,7                                          | 3,80                                                  | 1,7                                                 | 0,0724                                    | Tyfo® S Epoxy                          |

(сдвиг)  $R_m$ , поверхностная плотность волокна  $\rho_{\text{пов}}$ , толщина холста  $t$ , относительное удлинение волокна при разрыве  $\delta$ . В качестве выходного слоя приняты прочность на растяжение  $R_f$  и модуль упругости  $E_f$  углеродной ламели. Данные физико-механических характеристик представлены в таблице 1.

Для обеспечения статистической значимости независимых переменных использовалось количество входных данных, превышающее количество независимых переменных более чем в 4 раза. Для обучения, тестирования и контроля были выделены соответственно 70%, 15% и 15% данных. Архитектура нейронной сети включала многослойный перцептрон с одним промежуточным слоем, содержащим от 1 до 20 нейронов. При создании сети был исследован набор функций активации нейронов, включая линейную, логарифмическую сигмоидную и другие. Количество циклов обучения (эпох) было установлено на 1000.

Для обучения нейронной сети, например, использовался алгоритм BGFS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), который является итерационным

методом численной оптимизации. Он предназначен для поиска локального максимума или минимума нелинейной функции без ограничений. После анализа среднеквадратичных ошибок для дальнейшего использования была принята нейросеть MLP 6-7-2.

Для верификации нейросетевого прогнозирования были испытаны на осевое растяжение три образца ламелей размерами 300x20 мм, состоящих из волокон, например, SikaWrap 230C и двухкомпонентной эпоксидной матрицы FibArm Resin 230+ (рис. 2).





Рис. 2. Экспериментальные образцы углеродных волокон и эпоксидного клея

Испытания проводились на испытательной машине WEW-600D согласно ГОСТ 25.601-80 со средней скоростью нагружения, равной 0,05 кН/с. Деформации арматуры регистрировались экстензометром ИДН-10-50 (рис. 3).



Рисунок 3. Испытание композитных ламелей на осевое растяжение

#### Результаты исследования

В результате нейросетевого прогнозирования были получены средние значения прочности на растяжение и модуль упругости испытанной углеродной ламели, представленные на рис. 4.

|                                                                                                          |                                                       |                                                                     |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--|
| Predictions spreadsheet for Среднее значение модуля упругости, ГПа (лента) (Лист1 in Статья углепластик) |                                                       |                                                                     |  |
| Network: 1.MLP 6-7-2                                                                                     |                                                       |                                                                     |  |
| Samples: Missing                                                                                         |                                                       |                                                                     |  |
| Case name                                                                                                | Среднее значение модуля упругости, ГПа (лента) Target | Среднее значение модуля упругости, ГПа (лента) - Output 1.MLP 6-7-2 |  |
| 1                                                                                                        |                                                       | 236,9874                                                            |  |

|                                                                                                                 |                                                              |                                                                            |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--|
| Predictions spreadsheet for Среднее значение прочности на растяжение, ГПа (лента) (Лист1 in Статья углепластик) |                                                              |                                                                            |  |
| Network: 1.MLP 6-7-2                                                                                            |                                                              |                                                                            |  |
| Samples: Missing                                                                                                |                                                              |                                                                            |  |
| Case name                                                                                                       | Среднее значение прочности на растяжение, ГПа (лента) Target | Среднее значение прочности на растяжение, ГПа (лента) - Output 1.MLP 6-7-2 |  |
| 1                                                                                                               |                                                              | 3.576079                                                                   |  |

Рисунок 4. Результаты нейросетевого прогнозирования прочности на растяжение и модуль упругости композитных ламелей

Результаты натурных испытаний в виде диаграммы работы  $\sigma - \epsilon$  (напряжения-деформации) ламелей представлены на рис. 5.

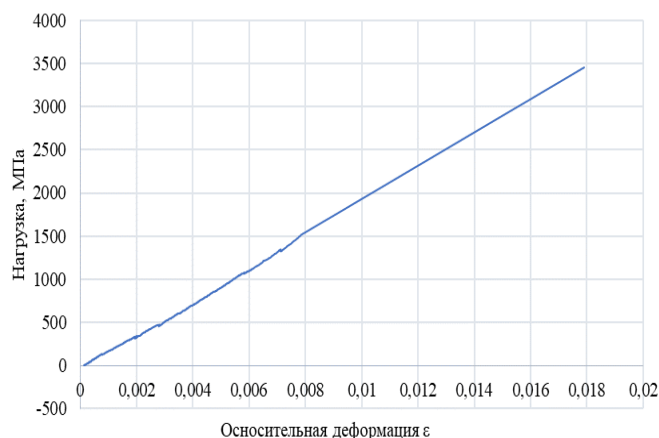


Рисунок 5. Диаграмма  $\sigma - \epsilon$  композитных образцов

Предельные значения прочности на растяжение и модуля упругости образцов показаны в табл. 2.

Таблица 2. Предельные значения прочности на растяжение и модуля упругости образцов

| $E_f$ , ГПа | $\sigma_f$ , МПа | $\epsilon_u$ , % |
|-------------|------------------|------------------|
| 234,88      | 3450,7           | 1,87             |

Сравнивая показатели нейросетевого прогнозирования и экспериментального исследования видно, что экспериментальная прочность на растяжение ламели из углеродного волокна на 3,5% меньше прогнозируемой, а экспериментальный модуль упругости меньше прогнозируемого на 0,88 %, что констатирует высокую сходимость исследуемого нейросетевого метода.

#### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований, была подобрана, обучена и экспериментально верифицирована нейросеть для прогнозирования физико-механических характеристик композитных ламелей,



предназначенных для усиления строительных конструкций. Максимальная разница результатов нейросетевого прогнозирования и натурного испытания составила 3,5%.

### Библиографический список

1. 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.
2. 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.].
3. Патент № 2652402 С1 Российская Федерация, МПК E04B 5/32. Способ возведения облегченных 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.
4. Техническая экспертиза несущих строительных конструкций административного здания в рамках его переустройства / С. М. Анпилов, В. И. Римшин, В. Л. Курбатов [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 3(18). – С. 28-33. – DOI 10.51608/26867818\_2022\_3\_28. – EDN KSSAMC.
5. Римшин, В. И. Исследование несущей способности сборных железобетонных плит с внутренней распоркой / В. И. Римшин, С. М. Анпилов, П. С. Трунтов // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2023. – № 6(1066). – С. 27-29. – EDN JSKMEQ.
6. Композитное усиление железобетонных изгибаемых элементов, поврежденных под воздействием хлоридной агрессивной среды / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин, Н. В. Фролов // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 1(20). – С. 29-34. – DOI 10.51608/26867818\_2023\_1\_29. – EDN YUOKZK.
7. Римшин, В. И. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом / В. И. Римшин, С. И. Меркулов, С. М. Есипов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – № 2(35). – С. 93-100. – DOI 10.5281/zenodo.1286034. – EDN USTLHE.
8. Усиление конструкций здания текстильной промышленности внешним армированием из композитных материалов / В. И. Римшин, В. Л. Курбатов, Е. С. Кецко, П. С. Трунтов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6(396). – С. 242-249. – DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_6\_242. – EDN AVPOAY.
9. Результаты расчета усиления строительных конструкций здания методом конечных элементов / В. И. Римшин, Е. С. Кецко, П. С. Трунтов [и др.] // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2020. – № 4(10). – С. 67-78. – EDN PRUWHF.
10. Амелин, П. А. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций внешним композитным армированием // VII Международный студенческий строительный форум - 2022: Сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума, Белгород, 24 ноября 2022 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. С. 13-20.
11. Амелин, П. А. Применение искусственного интеллекта на этапе проектирования зданий и сооружений // Строительство. Архитектура. Дизайн : Материалы Четвертой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Курск, 21 апреля 2023 года / Под редакцией С.И. Меркулова. Курск: Курский государственный университет, 2023. С. 11-17.
12. Автоматизация жизненного цикла зданий при реконструкции и капитальном ремонте / В. И. Римшин, И. Л. Шубин, В. Т. Ерофеев, А. А. Аветисян // Жилищное строительство. – 2022. – № 7. – С. 6-12. – DOI 10.31659/0044-4472-2022-7-6-12. – EDN LIMAVP.
13. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, имеющих повреждения арматуры вследствие контакта с хлоридной агрессивной средой / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин, А. А. Крючков // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 3(22). – С. 138-146. – DOI 10.51608/26867818\_2023\_3\_138. – EDN GATSZC.
14. Технологические процессы в строительстве : Учебное пособие / В. Л. Курбатов, В. И. Римшин, Е. Ю. Шумилова, М. В. Дайронас. – Москва : Издательство АСВ, 2020. – 601 с. – ISBN 978-5-903213-50-4. – EDN NOUTJA.
15. Римшин, В. И. Ресурс силового сопротивления железобетонных конструкций инженерных сооружений / В. И. Римшин, Л. И. Шубин, А. В.



- Савко // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 483-491. – EDN MTPETF.
16. Курбатов, В. Л. Геодезические работы в строительстве / В. Л. Курбатов, В. И. Римшин, Е. Ю. Шумилов. – Минеральные воды : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – 216 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 978-5-903213-43-6. – EDN VYVRCJ.
17. Рощина, С. И. Расчёт деформаций изгибаемых армированных деревянных элементов с учётом ползучести / С. И. Рощина, В. И. Римшин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 1(34). – С. 121-124. – EDN NXLTKN.
18. Бондаренко, В. М. Примеры расчета железобетонных и каменных конструкций : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Промышленное и гражданское строительство" направления подготовки дипломированных специалистов "Строительство" / В. М. Бондаренко, В. И. Римшин ; В. М. Бондаренко, В. И. Римшин. – Москва : Высш. шк., 2006. – (Для высших учебных заведений. Строительство). – ISBN 5-06-004437-8. – EDN QNMLGV.
19. Развитие теории деградации бетонного композита / В. И. Римшин, А. А. Варламов, В. Л. Курбатов, С. М. Анпилов // Строительные материалы. – 2019. – № 6. – С. 12-17. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-771-6-12-17. – EDN AWEKIX.
20. Курбатов, В. Л. Ползучесть цементных бетонов при расчете строительных конструкций / В. Л. Курбатов, Н. Д. Комарова, В. И. Римшин // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2016. – № 5(981). – С. 27-32. – EDN VUZWGZ.
21. Обследование и испытание зданий и сооружений : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальностям "Промышленное и гражданское строительство" направления подготовки "Строительство" / [В. Г. Казачек и др.]; под ред. В. И. Римшина. – Изд. 4-е, перераб. и доп.. – Москва : Студент, 2012. – ISBN 978-5-4363-0016-0. – EDN QNPXYD.
22. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors / V. I. Telichenko, V. I. Rimshin, A. V. Karelskii [et al.] // Journal of Industrial Pollution Control. – 2017. – Vol. 33, No. 1. – P. 1034-1041. – EDN XNTLSI.
23. Regulatory support for the use of composite rod reinforcement in concrete structures / S. Merkulov, V. Rimshin, E. Akimov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vladimir, 27–28 апреля 2020 года. – Vladimir, 2020. – P. 012022. – DOI 10.1088/1757-899X/896/1/012022. – EDN VUVIBU.
24. Mathematical modeling of groundwaters pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone / V. Telichenko, V. Rimshin, V. Eremeev, V. Kurbatov // MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 17–21 сентября 2018 года. Vol. 196. – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. – P. 02025. – DOI 10.1051/mateconf/201819602025. – EDN VBQAPP.

Исследования представленные в статье выполнены по гранту РААСН по теме: 3.1.1.1 «Несущая способность сжатых трубобетонных элементов квадратного поперечного сечения» 2023 год.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 06.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 06.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.



Научная статья  
УДК 691.327 : 666.973:539.4  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_108

## ЛЕГКИЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ПОЛИКОМПОНЕНТНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ<sup>1</sup>

© Авторы 2023  
SPIN: 2883-1204  
AuthorID: 792270

**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)

SPIN: 6626-3274  
AuthorID: 409255

**ПИЧУГИН Анатолий Петрович**

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

AuthorID: 468151

**ХРИТАНКОВ Владимир Федорович**

доктор технических наук, профессор  
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)*  
(Россия, Новосибирск)

**Аннотация.** Рассмотрена возможность применения в ячеистом бетоне вторичных органических отходов производства костры льна и опилок, для получения ячеисто-волокнистой структуры газобетона. Рассматривалось влияние вида заполнителя на свойства неавтоклавного газобетона. Исследовались составы, содержащие в качестве заполнителя при получении неавтоклавного газобетона костру льна и опилки, а также составы, где часть органического заполнителя была заменена на высоко-кальцевую золу и немолотый кварцевый песок. Определено оптимальное соотношение поликомпонентного органического заполнителя. Исследовались параметры приготовления и формования поризованных смесей на основе поликомпонентного органического заполнителя. Органический заполнитель оказывает существенное влияние на процессы, происходящие в газобетонной смеси в период созревания. Получен оптимальный состав сырьевой смеси для изготовления газобетона неавтоклавного твердения.

**Ключевые слова:** костра льна; опилки; ячеистая смесь; теплопроводность; усадка; прочность при сжатии; строительные материалы; вторичные ресурсы

**Для цитирования:** Смирнова О.Е., Пичугин А.П., Хританков В.Ф. Легкий бетон на основе поликомпонентного органического заполнителя // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 108-114. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_108

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



Original article

## LIGHTWEIGHT CONCRETE ON THE BASIS OF MULTI-COMPONENT ORGANIC AGGREGATE

© The Author(s) 2023

**SMIRNOVA Olga Evgenievna**

Candidate of Technical, Associate Professor

*Novosibirsk state University of architecture and civil engineering  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: smirnova.olj@yandex.ru)*

**PICHUGIN Anatoly Petrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Novosibirsk State Agrarian University  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: gmunsau@mail.ru)*

**KHRITANKOV Vladimir Fedorovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

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

**Abstract.** The article considers the possibility of using secondary organic waste from the production of fires of flax and sawdust in cellular concrete to obtain a cellular-fibrous structure of aerated concrete. The influence of the type of filler on the properties of non-autoclaved aerated concrete was considered. The article studies compositions containing flax and sawdust as fillers in the production of non-autoclaved aerated concrete, as well as compositions in which part of the organic filler was replaced by high-calcium ash and unground quartz sand. The optimal ratio of polycomponent organic filler has been determined. The parameters of preparation and molding of porous mixtures based on polycomponent organic fillers were studied. Organic filler has a significant impact on the processes occurring in the aerated concrete mixture during the maturation period. The optimal composition of the raw mix for the manufacture of non-autoclaved aerated concrete has been obtained.

**Keywords:** flax fire; sawdust; cellular mixture; thermal conductivity; shrinkage; compressive strength

**For citation:** Smirnova O.E., Pichugin A.P., Khritankov V.F. Lightweight concrete on the basis of multi-component organic aggregate // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 108-114. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_108

### Введение

Использование вторичных ресурсов при производстве строительных материалов является значительным резервом повышения эффективности строительства. Из сельскохозяйственных отходов можно выделить солому и костру льна, значительный объем выхода и специфические свойства которых позволяют ориентировать их использование для производства теплоизоляционных изделий. Также одним из распространенных видов вторичных продуктов промышленности являются отходы деревопереработки: опилки, стружка, которые могут применяться заполнителями в строительных материалах, без предварительной переработки [11, с. 24].

Решение проблемы получения строительных материалов на основе органического сырья нашло отражение в трудах российских ученых В.И. Бухаркина, Ю.П. Горлова, В.М. Курдюмовой, И.Х. Наназашвили, Б.Н. Понамаренко, И.А. Рыбьева, Н.И. Склизкова, В.М. Хрулева, В.Г. Хозина, С.А. Угрюмова и др.

Строительные материалы на основе растительного сырья (торфоплиты, камышит и др.) не могут быть отнесены к перспективным изоляционным материалам, так как имеют некоторые недостатки [6, с. 28]:

- неоднородность строения (анизотропность), обуславливающая различие показателей прочности и теплопроводности вдоль и поперек волокон, что создает затруднения при использовании для строительных изделий;

- гигроскопичность, т.е. способность поглощать и испарять влагу при изменении влажности и температуры окружающего воздуха (при возрастании влажности растительные волокна набухают, при уменьшении – усыхают);

- загниваемость, т.е. способность разрушаться под действием низших микроорганизмов в неблагоприятных условиях;

- легкая воспламеняемость, из-за которой строительные конструкции и части зданий являются огнеопасными, если не принимать специальных мер для защиты их от возгорания.



Из анализа литературных данных можно обобщить, что получение строительных материалов на основе органических отходов в основном осуществляется по следующим технологиям: изготовление изделий на растительном заполнителе без вяжущего, недостатком данного способа является высокая энергоемкость; изготовление изделий с применением в качестве связующих фенолформальдегидных и мочевиноформальдегидных смол, недостатком является выделение материалами в окружающую среду вредных веществ. Также при анализе технической патентной литературы не выявлены составы и параметры получения теплоизоляционных ячеистых бетонов на органических заполнителях [7, с. 109].

В связи с этим целью данного исследования является подбор оптимальных соотношений поликомпонентного органического заполнителя и связующих для получения поризованных материалов.

### *Материалы и методы исследования*

В качестве объектов исследования рассматривали органические заполнители костру льна и древесные опилки сосны и связующие.

Костра льна является побочным продуктом от переработки льна и одним из распространенных сельскохозяйственных отходов. Стебли льна при выделении волокна в процессах мятья и трепания разрушаются, а отпадающие одревесневшие части образуют костру [5, с. 98]. Размеры этих частиц колеблются от 1 до 10 мм по длине, толщина в пределах 0,3...1,5 мм.

Опилки древесные из хвойных пород (сосна), образуются в результате распила древесины, плотность 520-580 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от уровня влажности, коэффициент теплопроводности равен 0,061 Вт/(м<sup>20</sup>С). Размер опилок от 2,5 до 5 мм [15, с. 1].

Рассматривая данные сырьевые ресурсы растительного происхождения, следует отметить целый ряд объединяющих их свойств по химическому и элементному составу, по степени агрегации, по возможности использования для тех или иных технологических операций.

В качестве связующих в работе применяли:

- жидкое стекло –  $R_2O \cdot nSiO_2$ , удовлетворяющее требованиям ГОСТ 13078-2021 «Стекло натриевое жидкое. Технические условия», силикатный модуль 3,25-3,30, плотность 1,47 г/см<sup>3</sup>, pH = 13, условная вязкость 35-37 секунд;

- портландцемент ЦЕМ I 32,5Н, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия», с удельной поверхностью 280-300 м<sup>2</sup>/кг. Насыпная плотность – 1100-1300 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность 2950-3100 кг/м<sup>3</sup>. Сроки схватывания: начало – 125 мин, конец – 195 минут. Минералогический состав цемента:  $3CaOSiO_2$  - 45-60%,  $2CaO \cdot SiO_2$  - 20-30%,  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$  - 10-20%,  $3CaO \cdot Al_2O_3$  - 3-5%.

Молотая известь, вводилась в смесь для создания активной щелочной среды, необходимой

для обеспечения реакции газовыделения при получении поризованных теплоизоляционных изделий. Строительный гипс использовался в качестве тонкодисперсной минеральной добавки для обеспечения стабилизации структуры свежееотформованных изделий, уменьшения осадки поризованной массы и повышения прочности изделий [1, с. 150]. В качестве газообразователя применялась алюминиевая пудра марки ПАП-1, дисперсность 460-600 м<sup>2</sup>/кг. Водородный показатель водной вытяжки 5,5-5,6. Газовыделение при введении пудры в цементный раствор должно начинаться через 1-2 мин и продолжаться 15-20 мин. Максимальное выделение водорода происходит при температуре смеси 30-40°С. Для приготовления алюминиевой суспензии используется сульфатол (алкилбензосульфат).

### *Результаты и обсуждение*

Исследовалась возможность применения в ячеистом бетоне вторичных органических отходов производства костры льна и опилок, для получения ячеисто-волокнистой структуры газобетона. По сравнению с общеизвестными составами газобетона неавтоклавного твердения, в газобетоне на основе органических отходов кремнеземистый компонент (кварцевый песок, золы, шлаки и др.) частично или полностью заменен растительным наполнителем, в качестве вяжущего используется портландцемент [2, с. 13].

Особенности формирования органоминеральных композиций принципиально отличаются от структурообразования материалов на минеральных заполнителях и вяжущих. Это объясняется различием физико-химических свойств заполнителей, а также свойств заполнителей и затвердевшего камня минеральных вяжущих веществ. Так влажностные деформации цементного камня составляют 0,3-0,4 %, а растительного заполнителя 1,5-2 %. Прочность конгломерата на минеральных заполнителях и минеральных вяжущих складывается из прочности камня минеральных вяжущих, прочности крупного заполнителя и прочности сцепления между ними. Прочность структуры органоминеральных материалов обеспечивается прочностью затвердевшего камня вяжущих и адгезионной прочностью между органическим заполнителем и камнем. Химически активные вещества, содержащиеся в растительных отходах, уменьшают адгезию между заполнителем и цементным камнем при формировании структуры органоминеральных материалов. При подборе оптимального состава ячеистого бетона на органических отходах необходимо минимизировать деструкционные процессы, характеризующиеся подверженностью органических заполнителей значительным деформациям при изменении влажности [3; 10; 14].

Рассматривалось влияние вида заполнителя на свойства неавтоклавного газобетона. Исследовались составы, содержащие в качестве заполнителя при получении неавтоклавного газобетона костру льна и опилки, а также составы, где часть органического заполнителя была заменена на высококальциевую

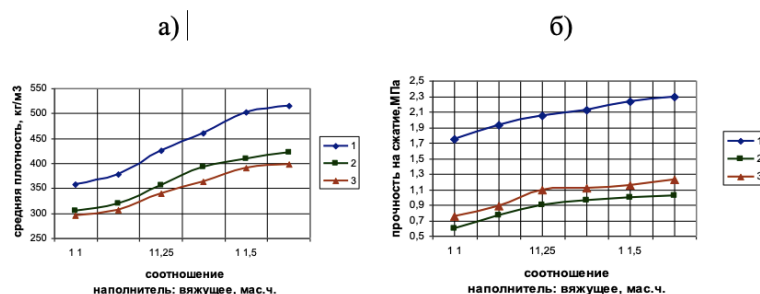


Рисунок 1. Зависимость средней плотности (а) и прочности при сжатии (б) газобетона от вида заполнителя: 1 - поликомпонентный органический заполнитель + песок, 2 - поликомпонентный органический заполнитель + зола, 3 - поликомпонентный органический заполнитель

золу и немолотый кварцевый песок, в соотношении 0,5:0,5 %, мас. (таблица 1). Соотношение заполнителя и вяжущего варьировалось в пределах 1:1 – 1:1,5 (% , мас.).

Таблица 1. Характеристика газобетона на основе растительного заполнителя

| Состав заполнителя в газобетоне                   | Соотношение заполнителя к вяжущему | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Прочность при сжатии, МПа |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Поликомпонентный органический заполнитель + песок | 1:1                                | 360                                  | 1,75                      |
|                                                   | 1:1,25                             | 425                                  | 2,05                      |
|                                                   | 1:1,5                              | 502                                  | 2,23                      |
| Поликомпонентный органический заполнитель + зола  | 1:1                                | 305                                  | 0,69                      |
|                                                   | 1:1,25                             | 354                                  | 0,97                      |
|                                                   | 1:1,5                              | 410                                  | 1,09                      |
| Поликомпонентный органический заполнитель         | 1:1                                | 295                                  | 0,76                      |
|                                                   | 1:1,25                             | 345                                  | 1,08                      |
|                                                   | 1:1,5                              | 390                                  | 1,14                      |

По результатам эксперимента и многофакторного анализа определено соотношение поликомпонентного органического заполнителя. Оптимальный полифракционный состав костры льна / опилок установлен при сочетании фракций 10 / 5 и 5 / 2,5 мм в соотношении 1:2. Содержание фракции 5/2,5 мм в валовой пробе костры льна / опилок более 60 %, что позволяет применять данные органические заполнители без предварительной подготовки. Также применение полифракционного растительного заполнителя позволяет повысить прочностные

характеристики за счет армирующего эффекта более крупной фракции костры льна и за счет «свойлачивания» – переплетения древесных волокон с кострой льна и физического взаимодействия поверхностей разных по структуре органических заполнителей [4; 12].

Анализируя представленные в таблице данные, можно отметить, что минимальные значения средней плотности образцов газобетона, равные 295-305 кг/м<sup>3</sup>, получены на составах с соотношением заполнитель: вяжущее = 1:1, в которых заполнителем являются костра льна/опилки или смесь костры льна и опилок с золой. Добавление кварцевого песка приводит к повышению средней плотности образцов газобетона на 25-30 %.

Зависимость свойств газобетона от содержания костры льна показана на рисунке 1.

Исследовались параметры приготовления и формирования поризованных смесей на основе поликомпонентного органического заполнителя. Органический заполнитель оказывает существенное влияние на процессы, происходящие в газобетонной смеси в период созревания. Для определения этого влияния изучались, высота вспучивания ячеистой массы после заливки смеси в форму и появление усадочных явлений в образцах.

Газобетонная смесь заливалась на 2/3 высоты формы, измерения проводились от 0 до 30 мин с шагом 5 мин и от 20 до 220 с шагом 40 мин. Для всех составов на органическом заполнителе определяющим был фактор предварительной обработки водным раствором жидкого натриевого стекла (рисунок 2).



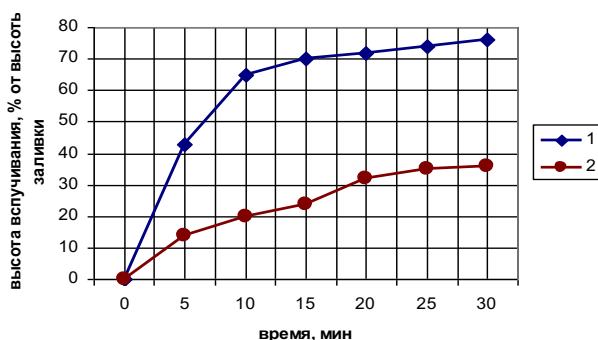


Рисунок 2. Влияние предварительной обработки поликомпонентного органического заполнителя на высоту вспучивания газобетонной смеси: 1 - обработка раствором жидкого натриевого стекла; 2 - без обработки.

Смесь, содержащая предварительно обработанную костру льна и опилки, лучше вспучивается, и высота «горбушки» достигает 65-70% от высоты заливки в течение 10-15 мин., это объясняется тем, что содержащаяся в необработанной костре льна и опилках гемицеллюлоза препятствует активизации процесса вспучивания. Также предварительная обработка и перемешивание волоконполикомпонентного органического заполнителя с жидким натриевым стеклом обеспечивает равномерное их распределение по всему объему и исключает процесс агрегации массы. При использовании в составе заполнителя золы при соотношении органического заполнителя и золы 1:1 (мас. ч.) газобетонная смесь хорошо вспучивается, осадка смеси составляет 11%. При использовании кварцевого песка в составе заполнителя масса хорошо вспучивается, но ее осадка достигает 14%. При использовании в качестве заполнителя только костры льна и опилок смесь хорошо вспучивается, осадка поризованной массы до 4 %, что обусловлено волокнистым строением растительного заполнителя.

Таким образом, применение в качестве наполнителя при получении ячеистого бетона костры льна и опилок, способствует дисперсному армированию структуры газобетона, кроме того, уменьшаются усадочные деформации, которые препятствуют микротрещинообразованию, что приводит к увеличению прочностных характеристик газобетона.

Технология приготовления сырьевой смеси для ячеистых бетонов следующая. Измельченную костру льна и опилки вымачивают в водном растворе жидкого стекла, затем последовательно добавляют портландцемент, известь, гипс, воду, с последующим введением алюминиевой пудры. Твердение осуществляется по режиму: 3 ч. при температуре 20°C, 12 ч. при температуре 40°C, 7 суток в нормальных условиях. В качестве контрольных показателей определяли среднюю плотность, теплопроводность, усадку. Составы и свойства ячеистой смеси приведены в таблице 2.

По результатам испытаний ячеистобетонной смеси образцы имеют объемную плотность от 350 до 450 кг/м<sup>3</sup>, открытую пористость 38-45%, предел прочности при сжатии от 0,9 до 1,5 МПа, сопротивление осевому растяжению от 0,13 до 0,23 МПа. Показатели качества ячеистого бетона, полученного из предложенной сырьевой смеси, соответствуют классу В1 - В1,5 и позволяют применять его как теплоизоляционный и теплоизоляционно-конструкционный материал.

Таблица 2. Состав сырьевой смеси и свойства газобетона.

| Состав сырьевой смеси и свойства газобетона | Показатели для состава сырьевой смеси: |       |       |       |       |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                             | №1                                     | №2    | №3    | №4    | №5    |
| Цемент, мас. %                              | 24                                     | 26    | 28    | 30    | 32    |
| Костра льна, мас. %                         | 12                                     | 11    | 10    | 9     | 8     |
| Опилки, мас. %                              | 12                                     | 11    | 10    | 9     | 8     |
| Жидкое стекло, мас. %                       | 4,4                                    | 4,3   | 4,2   | 4,1   | 3,9   |
| Известь, мас. %                             | 2,3                                    | 2,5   | 2,7   | 2,9   | 3,1   |
| Гипс, мас. %                                | 1,9                                    | 2,1   | 2,3   | 2,5   | 2,6   |
| Алюминиевая пудра, мас. %                   | 0,31                                   | 0,33  | 0,35  | 0,37  | 0,38  |
| Вода, мас. %                                | остальное                              |       |       |       |       |
| Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>        | 300                                    | 315   | 350   | 380   | 450   |
| Теплопроводность, Вт/(м°C)                  | 0,079                                  | 0,081 | 0,086 | 0,088 | 0,091 |
| Усадка, мм/м не более                       | 0,3                                    | 0,3   | 0,3   | 0,3   | 0,3   |
| Прочность на сжатие, МПа                    | 0,90                                   | 0,96  | 1,14  | 1,20  | 1,50  |
| Прочность при изгибе, МПа                   | 0,13                                   | 0,14  | 0,19  | 0,21  | 0,23  |

Характер пористости образцов газобетона на основе костры льна и опилок изучался с помощью ртутно-вакуумной порометрии на ртутном порометре «Porosimeter – 2000» по измерению кривых вдавливания ртути. Суммарный объем пор 0,78 см<sup>3</sup>/г, распределение пор в межпоровых перегородках газобетона составляет: поры радиусом более 30 мкм – 4,3%; от 0,1-30 мкм – 52,2%; менее 0,1 мкм – 43,5%. Интегральная и дифференциальная кривые распределения пор в газобетоне приведены на рисунке 3.

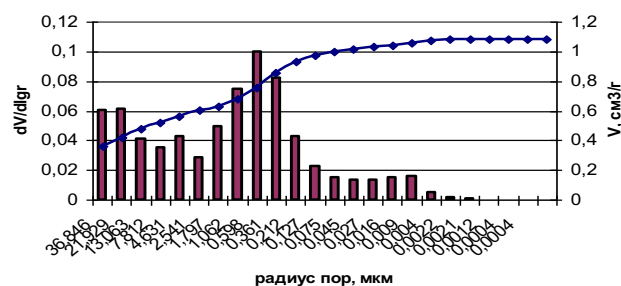


Рисунок 3. Дифференциальная кривая распределения пор в газобетоне на основе поликомпонентного органического заполнителя

Образцы газобетона имеют равномерно распределенную пористость в диапазоне пор размером 0,0012 – 0,075 и 1,062 -13,063 мкм. Средний диаметр пор составляет 14,83 мкм.

Поверхность газобетона на основе поликомпонентного органического заполнителя отличается равномерно распределенной мелкопористой структурой с вкраплениями крупных пор (рисунок 4).

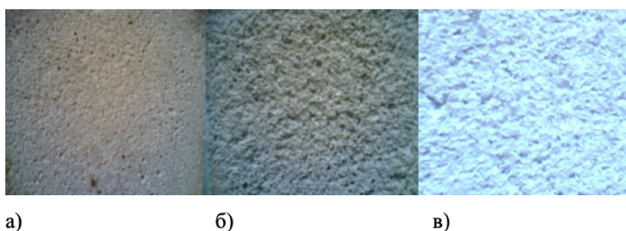


Рисунок 4. Поверхность газобетонных образцов на основе поликомпонентного органического заполнителя увеличение 1:1 (а), в 1,5 раза (б), в 3,0 раза (в).

#### Выводы

Результатом применения в составе ячеистой смеси поликомпонентного органического заполнителя является улучшение показателей эксплуатационных свойств газобетона неавтоклавного твердения (низкая плотность и теплопроводность, при относительно высоких прочностных характеристиках), а также расширение сырьевой базы за счет утилизации многотоннажных отходов.

Установлено, что использование поликомпонентного органического заполнителя фракции менее 5/2,5 мм в составе сырьевых смесей для получения газобетона позволяет полностью заменить кварцевый песок. Отношение органического заполнителя к вяжущему 1:1,25 и 1:1,5 (мас.ч.). Набухание органического заполнителя составляет 2% и это частично компенсирует усадку газобетона, которая составляет 3-3,5%.

Получен оптимальный состав сырьевой смеси для изготовления газобетона неавтоклавного твердения включающий, мас. %: портландцемент – 24-32; костра льна с размерами волокон 2,5 - 5 мм – 8-12; опилки древесные с размерами волокон 0,15 - 2,5 мм – 8-12; жидкое стекло – 3,9-4,4; молотая известь – 2,3-3,1; строительный гипс – 1,9-2,6; алюминиевая пудра – 0,31-0,38; вода – остальное.

#### Библиографический список

1. Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида / Л. А. Абдрахманова, Р. Р. Галеев, А. Г. Хантимиров, В. Г. Хозин // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 150-157. – DOI 10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157. – EDN RROOER.
2. Модификация материалов на основе сульфата

кальция комплексными минеральными добавками / М. Д. Батова, Ю. А. Семенова, А. Ф. Гордина [и др.] // Строительные материалы. – 2021. – № 1-2. – С. 13-21. – DOI 10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-13-21. – EDN MULNGY.

3. Ибрагимов, Р. А. Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии / Р. А. Ибрагимов, Л. И. Потапова, Е. В. Королёв // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – № 3(57). – С. 41-49. – DOI 10.52409/20731523\_2021\_3\_41. – EDN XHUPYY.
4. Исследование методом оптической микроскопии высокого разрешения структуры и морфологии наноцеллюлозы - микродобавки строительных композитов / Л. Ю. Матвеева, М. В. Мокрова, В. И. Хирасова, И. В. Баранец // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 1(84). – С. 109-116. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-109-116. – EDN PCKPFZ.
5. Наназашвили, И.Х. Влияние специфических свойств древесного заполнителя на структурную прочность арболита / И.Х. Наназашвили, А.И. Минас, Н.И. Склизов // Труды ЦНИИЭПсельстроя. – 1975. - №12. – С. 98-105.
6. Прочность гранул крупного пористого заполнителя из растительного сырья в легком бетоне / А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, О. Е. Смирнова, М. А. Пичугин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – № 11(743). – С. 28-41. – DOI 10.32683/0536-1052-2020-743-11-28-41. – EDN QPNBKI.
7. Защитно-отделочные составы и композиции для ремонтных работ и обеспечения долговечности зданий / А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, О. Е. Смирнова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 9(729). – С. 109-122. – DOI 10.32683/0536-1052-2019-729-9-109-122. – EDN JBRTZO.
8. Трещинообразование в крупнопористом бетоне с интегральным расположением крупного заполнителя / А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, О. Е. Смирнова, Е. Г. Пименов // Эксперт: теория и практика. – 2020. – № 4(7). – С. 47-52. – DOI 10.24411/2686-7818-2020-10035. – EDN EGDVIZ.
9. Патент РФ 2701911. Способ получения гидрозоля монодисперсного нанокремнезема для изготовления бетона / Баскаков П.С., Строкова В.В., Кузьмин Е.О., Заяв. 20.03.2019. Оpubл. 02.10.2019. Бюл. № 7.
10. Патент РФ 2775585. Наномодифицирующий высокопрочный легкий бетон на композиционном вяжущем / Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Королёв Е.В. Заяв.10.12.2021. Оpubл. 05.07.2022. Бюл. № 2.
11. Пичугин, А. П. Эффективные технологии при



- использовании растительного сырья в строительстве / А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков, О. Е. Смирнова ; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). – Новосибирск : Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2020. – 192 с. – ISBN 978-5-7795-0922-0. – EDN RHZMDF.
12. Яковлев, Г. И. Костромит на основе цементно-силикатного вяжущего / Г. И. Яковлев, Ю. Н. Гинчицкая, А. Ф. Бурьянов // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сборник материалов международной научной конференции, Москва, 16–17 ноября 2016 года / ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. – С. 655-656. – EDN XSNHWL.
  13. Lesovik V., Tolstoy A., Fediuk R., Amran M., Azevedo A., Ali M., Ali Mosaberpanah M., Asaad M.A. Four-component high-strength polymineral binders // Construction and Building Materials. 2022. T. 316. C. 125934.
  14. Proshin A.P., Volkova E.A., Beregovoi A.M., Soldatov S.N. New thermal insulated materials // Problems and protects in ecological engineering Program, report and information at International scientific and technical conference, 25 May 2001, Tenerife, Spain 2001 – P. 108-110.
  15. Smirnova O., Pichugin A., Sebelev I. Research of pressed thermal insulation materials, based on organic waste // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. BRISTOL, 2020. C. 012051.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 23.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья

УДК 691

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_115

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОНДИЦИОННОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ<sup>1</sup>

© Авторы 2023

SPIN: 7487-7522

ORCID 0000-0002-5747-9070

ResearcherID: H-4667-2016

ScopusID: 55985081000

**СТОЛБОУШКИН Андрей Юрьевич**

доктор технических наук, профессор кафедры инженерных конструкций,  
строительных технологий и материалов

*Сибирский государственный индустриальный университет  
(Россия, Новокузнецк)*

SPIN: 1395-0096

**ФОМИНА Оксана Андреевна**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
(Россия, Москва)*

**ДАШЖАМЦ Далайн**

академик Монгольской академии наук, д.т.н., профессор

*Монгольский государственный университет науки и технологий  
(Монголия, Улан-Батор, e-mail: ddashjamts@must.edu.mn)*

**Аннотация.** Приведены перспективы получения керамических изделий на основе промышленных отходов при использовании новых рациональных способов массоподготовки некондиционного сырья, обеспечивающих формирование матричной структуры.

**Ключевые слова:** промышленные отходы; матричная структура; дисперсионная среда; агрегированная дисперсная фаза; керамические стеновые материалы

**Для цитирования:** Перспективы использования некондиционного сырья в производстве керамических изделий / А.Ю. Столбоушкин, О.А. Фомина, Д. Дашжамц // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 115-119. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_115

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



## PROSPECTS OF USING NON-CONFORMING RAW MATERIALS IN CERAMIC MANUFACTURING

© The Author(s) 2023

**STOLBOUSHKIN Andrey Yurievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department  
*Siberian State Industrial University*  
(Russia, Novokuznetsk, e-mail: stanyr@list.ru)

**FOMINA Oksana Andreevna**

Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow  
*Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences*  
(Russia, Moscow)

**DASHZHAMTS Dalain**

Academician of the Mongolian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor  
*Mongolian University of Science and Technology*  
(Mongolia, Ulaanbaatar, e-mail: ddashjamts@must.edu.mn)

**Abstract.** The prospects for the production of ceramic products utilizing industrial waste and novel rational methods of mass preparation of substandard raw materials, resulting in the formation of a matrix structure, have been presented.

**Keywords:** industrial waste; matrix structure; dispersion medium; aggregate dispersed phase; ceramic wall materials

**For citation:** Prospects of using non-conforming raw materials in ceramic manufacturing / A.Y. Stolboushkin, O.A. Fomina, D. Dashzhamts // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 115-119. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_115

Для большинства районов Западной Сибири и Дальнего Востока характерно отсутствие промышленных запасов высококачественных глин, которые можно использовать в качестве сырьевой базы современных кирпичных заводов. В тоже время, в промышленных регионах Сибири находится огромное количество так называемых техногенных месторождений, к примеру, в Кемеровской области сосредоточено больше половины твердых минеральных отходов Российской Федерации [1], и их дальнейшее интенсивное накопление без эффективной переработки и утилизации представляет серьезную экологическую опасность.

Причинами медленного освоения техногенного сырья в производстве стеновой керамики являются нестабильность его состава и свойств, несоответствие требованиям ГОСТ 9169-75 «Сырье глинистое для керамической промышленности», а также недостаточная изученность физико-химических процессов, протекающих при обжиге такого сырья. Очевидно, что при использовании промышленных отходов для производства качественного кирпича применение классических подходов к массоподготовке, формированию структуры сырца, организации тепломассообменных процессов при сушке и обжиге, не обеспечивает требуемых эксплуатационных характеристик изделий. Как бы ни были близки по свойствам к глинистому сырью отходы, например, угледобычи и углеобогащения, производство на их основе

керамического кирпича сопряжено с необходимостью решения многих технологических проблем, и его качество не может сравниться с продукцией кирпичных заводов, работающих на природном сырье.

В керамике одним из таких подходов является разработка керамических композиционных материалов (ККМ) [2]. Благодаря синергизму за счет комбинации керамической основы с арматурой эти материалы обладают высокими эксплуатационными характеристиками. Во многом эти и другие замечательные свойства композиционных материалов определяются межфазным взаимодействием компонентов, которое зависит от их термодинамической, кинетической и механической совместимости [3].

Обычно совместимость матрицы и заполнителя, составляющих композиционный материал, в части химической кинетики и термодинамического равновесия фаз достигается далеко не всегда. В тоже время их «механическое взаимодействие» обеспечивает после обжига целостную (монокристаллическую) структуру композита и стабильность его свойств. Механическая совместимость определяется, прежде всего, соотношением деформационных показателей и коэффициентов термического расширения дисперсионной среды и дисперсной фазы матричного композита.

В архитектурно-строительном институте СибГИУ под руководством проф. Столбоушкина А.Ю.



сформировано научное направление: «Строительные керамические материалы матричной структуры на основе техногенного и природного сырья» [4]. Практическая реализация инновационной идеи направлена на формирование рациональной структуры керамики посредством организации упорядоченного ячеисто-заполненного каркаса на стадии приготовления шихты. В результате анализа многочисленных моделей структур композиционных материалов было найдено технологическое решение эффективного использования некондиционного сырья для получения высококачественной керамики. При этом, матричная структура керамического черепка представлена двумя составными частями: матрицей, которая является продуктом высокотемпературных превращений глинистых минералов, и макрозаполнителем, в виде минеральных зерен, заключенных в ней.

*Керамические матричные композиты* были получены путем объединения тонкодисперсных частиц малопластичного неспекающегося сырья в гранулы, покрытием поверхности гранул глинистым веществом, прошедшим механоактивацию, с последующим компрессионным формованием изделий, их сушкой и обжигом (Патент РФ № 2005702 [5]). При обжиге происходит трансформация матричной структуры сырца в керамический матричный композит. На границе контакта гранул активированная глинистая составляющая шихты продуцирует расплав, который внедряется в периферийную зону ядра и после кристаллизации образует матричную структуру, состоящую из ядер, покрытых оболочкой из продуктов спекания глины. В свою очередь, оболочка имеет свое внутреннее «армирование», повышающее прочностные характеристики матрицы. Условно ее формирование под влиянием внешних воздействий можно рассматривать как последовательный процесс образования стеклокристаллической микроструктуры.

В институте разработаны *рациональные способы массоподготовки сырья* в технологии стеновой керамики компрессионного формования при использовании малокондиционного глинистого и других видов природного алюмосиликатного сырья (трепелы, опоки и др.). Избежать дефектов структуры керамических изделий полусухого прессования [6] позволяет разработанный способ формирования оптимальных структур керамического кирпича за счет тонкого сухого помола, грануляции, компрессионного формования, сушки и обжига изделий (Патент РФ № 2500647 [7]). Многочисленные лабораторные исследования показали, что необходимое количество воды для грануляции порошков составляет 10-17 мас. %. Экспериментальные данные по влажности сопоставимы с экструзионной технологией жесткого формования, поэтому при характеристике способа был использован термин «компрессионное формование».

Актуальны проводимые в институте исследования по созданию *ячеистой керамики с матричной структурой*. При этом формируется

эффективная структура керамики с упорядоченным каркасом из макропор, имеющих стеклокристаллическую оболочку. Для решения этой задачи разработан и запатентован новый способ изготовления условно-эффективных и эффективных стеновых керамических изделий на основе низкокачественного природного сырья с пространственно-организованной ячеистой структурой (Патент РФ № 2593832 [8]). В основу способа заложены вышеуказанные технологические принципы формирования керамических матричных композитов. Грануляция увлажненных гранул пеностекла с высушенным и измельченным глинистым или кремнистым сырьем, последующее прессование, сушка и обжиг изделий обеспечивают формирование ячеистой структуры керамического черепка с высоким коэффициентом конструктивного качества и пониженной средней плотностью.

Еще одним перспективным направлением развития технологии керамических стеновых материалов из некондиционного сырья является *объемное окрашивание керамических изделий* на основе техногенного и природного глинистого сырья минеральными пигментами, полученными из промышленных отходов (Патент РФ № 2641533 [9], Патент РФ № 2701657 [10]).

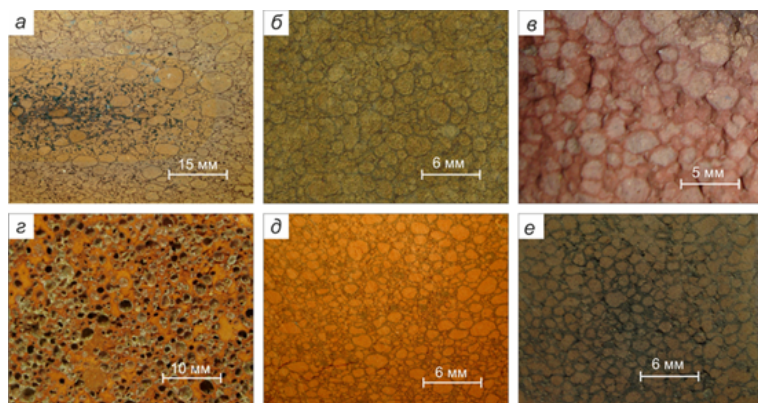
Как показали исследования, применение часто используемых для обычных кирпичных глин «щелочноземельных осветлителей» неприемлемо в случае использования техногенного сырья, содержащего, как правило, большое количество карбонатных примесей. Использование импортных красящих пигментов дорого и в условиях текущего курса рубля значительно утяжеляет себестоимость продукции. Поэтому, молодыми учеными кафедры под руководством автора разрабатываются принципы структурного окрашивания керамических матричных композитов на основе техногенного и природного сырья. Интенсивное окрашивание керамики при минимальном количестве добавок достигается за счет концентрации их в тонком слое на поверхности гранул при опудривании.

Наиболее приемлемым является использование различных минеральных добавок и отходов, содержащих соли и оксиды металлов, таких как  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и др.. Было установлено, что минеральные добавки с высоким содержанием указанных металлов, в частности отходов, содержащих  $\text{V}_2\text{O}_5$  в количестве 3-5 мас.%, обеспечивают интенсивное окрашивание образцов за счет концентрации на поверхности гранул и получение керамического черепка с водопоглощением 7-10 % и прочностью при сжатии более 65 МПа при использовании ванадиевого шлака (Патент РФ № 2487844 [11]).



В результате разработанных научных основ и технологических принципов, изложенных выше, получена серия керамических матричных композитов на основе некондиционного сырья, представленная на рисунке.

Рисунок – Матричная структура стеновых



керамических изделий на основе: железорудных отходов (а, б); отходов углеобогащения (в); гранулированного пеностекла из кремнистых пород (г); суглинка с добавкой отходов обогащения марганцевых руд (д); железорудных отходов с добавкой ванадиевого шлака (е)

## Библиографический список

1. Прошунин, Ю. Е. Концепция технопарка о развитии отрасли управления отходами в Кузбассе / Ю. Е. Прошунин, Е. П. Волюнкина // Управление отходами - основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе : Сборник докладов Второй международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 08–10 октября 2008 года / Редакционная коллегия: Протопопов Е.В., Волюнкина Е.П. (главный редактор), Галанина Т.В., Коротков С.Г., Нохрина О.И., Никитенко С.М., Харлашин П.С.. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2008. – С. 15-20. – EDN SBBFER.
2. Пивинский, Ю. Е. Кварцевая керамика, искусственные керамические вяжущие (ВКВС) и керамобетоны - история и перспективы развития технологий / Ю. Е. Пивинский // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 3. – С. 8-17. – EDN NBIGPL.
3. Столбоушкин, А. Ю. Метод комплексного исследования переходного слоя ядро - оболочка в керамических матричных композитах полусухого прессования / А. Ю. Столбоушкин // Строительные материалы. – 2019. – № 9. – С. 28-35. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-774-9-28-35. – EDN QCABRJ.
4. Керамические стеновые материалы матричной структуры на основе неспекающегося малопластичного техногенного и природного сырья / А. Ю. Столбоушкин, Г. И. Бердов, В. И. Верещагин, О. А. Фомина // Строительные материалы. – 2016. – № 8. – С. 19-24. – EDN WMSBOR.
5. Патент № 2005702 С1 Российская Федерация, МПК C04B 33/02, C04B 33/00, C04B 33/132. Способ изготовления керамических изделий : № 4948690/33 : заявл. 25.06.1991 : опубл. 15.01.1994 / Г. И. Стороженко, А. Ю. Столбоушкин, Г. В. Болдырев [и др.] ; заявитель Сибирский металлургический институт им.Серго Орджоникидзе. – EDN RARXWJ.
6. Шлегель, И. Ф. Проблемы полусухого прессования кирпича / И. Ф. Шлегель // Строительные материалы. – 2005. – № 2. – С. 18-19. – EDN JVOGTF.
7. Патент № 2500647 С1 Российская Федерация, МПК C04B 33/132. Сырьевая смесь для изготовления стеновой керамики и способ ее получения : № 2012116133/03 : заявл. 20.04.2012 : опубл. 10.12.2013 / А. Ю. Столбоушкин, Г. И. Стороженко, А. И. Иванов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный индустриальный университет". – EDN EAYURY.
8. Патент № 2593832 С1 Российская Федерация, МПК C04B 33/13. Способ изготовления стеновых керамических изделий : № 2015121962/03 : заявл. 08.06.2015 : опубл. 10.08.2016 / А. И. Иванов, А. Ю. Столбоушкин, Г. И. Стороженко ; заявитель общество с ограниченной ответственностью "Баскей керамик". – EDN KVOENR.
9. Патент № 2641533 С1 Российская Федерация, МПК C04B 33/132, B09B 3/00. Способ получения сырьевой смеси для декоративной стеновой керамики : № 2016147274 : заявл. 01.12.2016 : опубл. 18.01.2018 / А. Ю. Столбоушкин, Д. В. Акст, А. И. Иванов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный индустриальный университет". – EDN KQRWYO.
10. Патент № 2701657 С1 Российская Федерация, МПК C04B 33/132. Способ получения сырьевой смеси для декоративной строительной керамики : № 2018145385 : заявл. 19.12.2018 : опубл. 30.09.2019 / Д. В. Акст, А. Ю. Столбоушкин, О. А. Фомина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный индустриальный университет"





ФГБОУ ВО "СибГИУ". – EDN ITQSKV.

11. Патент № 2487844 С1 Российская Федерация, МПК С04В 33/132. сырьевая смесь для изготовления стеновых керамических изделий : № 2012104942/03 : заявл. 13.02.2012 : опубл. 20.07.2013 / А. Ю. Столбоушкин, Г. И. Стороженко, Г. И. Бердов [и др.] ; заявитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский государственный индустриальный университет". – EDN EFEYXY.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 23.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья

УДК 691

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_120

## РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ШЛАМОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ<sup>1</sup>

© Авторы, 2023

SPIN: 5316-5749

**ТАРАКАНОВ Олег Вячеславович**

доктор технических наук, профессор

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (Россия, Пенза, e-mail: tarov60@mail.ru)*

SPIN: 1106-9075

**БЕЛЯКОВА Елена Александровна**

кандидат технических наук, доцент, кафедра строительного производства и конструкций

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (Россия, Пенза)*

**ФИШЕР Ханс-Бертрам**

доктор технических наук, профессор

*Технический университет*

*(Германия, Веймар)*

**Аннотация.** Рассмотрена возможность применения карбонатных шламов химводоочистки предприятий энергетики в производстве строительных растворов. Показано, что прочность строительных растворов с добавками шлама возрастает на 30-70% по сравнению с контрольным составом. Представлены результаты влияния индивидуальных и бинарных карбонатсодержащих микронаполнителей на прочность бетонов нового поколения.

**Ключевые слова:** карбонатные шламы; строительные цементные растворы; отделочные материалы; прочность; формирование микроструктуры; суперпластификаторы; карбонатные минеральные микронаполнители; композиционные цементы; высокопрочные бетоны

**Для цитирования:** Расширение области применения минеральных шламов в производстве строительных и отделочных материалов / О.В. Тараканов, Е.А. Белякова, Х.-Б. Фишер // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 120-124. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_120

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



Original article

## EXTENSION OF THE APPLICATION FIELD OF THE MINERAL SLUDGE IN CONSTRUCTION AND FINISHING MATERIALS

© The Author(s) 2023

**TARAKANOV Oleg Vyacheslavovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Penza State University of Architecture and Construction*

*(Russia, Penza, e-mail: tarov60@mail.ru)*

**BELIAKOVA Elena Aleksandrovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of  
Construction Production and Structures

*Penza State University of Architecture and Construction*

*(Russia, Penza)*

**FISCHER Hans-Bertram**

Dr. of Technical, Prof.

*Technical University (Germany, Weimar)*

**Abstract.** The article considers the possibility of the application of carbonate slurry chemical purification by energy enterprises in the production of construction solutions. It is shown that the strength of mortar solutions with sludge additives increases by 30–70% compared to the control composition. The results of the influence of individual and binary carbonate-containing microfillers on the strength of new-generation concrete are presented.

**Keywords:** carbonate slurries; cement mortars; finishing materials; strength; formation of microstructure; superplasticizers; carbonate mineral microfillers; composite cements; high-strength concrete

**For citation:** Extension of the application field of the mineral sludge in construction and finishing materials / O.V. Tarakanov, E.A. Belyakova, H.-B. Fischer // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 120-124. (In Russ.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_120

В последние годы все большее внимание ученых привлекают минеральные шламовые отходы предприятий различных отраслей промышленности. Подобные «мокрые» отходы образуются на предприятиях химической, машиностроительной, фармацевтической, энергетической и других отраслей. Шламы образуются в виде осадков в процессе реагентной обработки или нейтрализации жидких промышленных стоков, накапливаются в шламбассейнах и затем вывозятся на поля фильтрации. После частичного обезвоживания образуется шлам в виде предельно концентрированной суспензии водосодержанием 40-60%, отличающийся большой устойчивостью структуры, однородностью и постоянством химического состава. Одним из перспективных направлений утилизации шламовых отходов является использование их в производстве строительных и отделочных материалов. В данной работе рассмотрена возможность применения карбонатных шламов предприятий энергетики, образующихся в процессе химической подготовки воды для котельных установок в производстве штукатурных и кладочных растворов, а также

тонкодисперсных карбонатных микронаполнителей в технологии высокопрочных бетонов.

В г. Пенза накоплен большой опыт использования карбонатного шлама, а также гипсосодержащего шлама предприятиями по производству хрусталя в строительных и отделочных материалах. В течение 10 лет подобные шламы успешно использовались в производстве штукатурных и кладочных растворов, а также в производстве вододисперсионных красок, шпатлевок, затирочных паст и т.д. [1]. Подобный опыт использования карбонатных шламов накоплен в Самаре [2].

Перспективным направлением применения карбонатных шламов, а также других тонкодисперсных карбонатных материалов является использование их в производстве композиционных цементов и высокопрочных бетонах [4]. Подобное направление является чрезвычайно актуальным, поскольку позволяет снижать клинкероемкость цементов, а, следовательно, снижать экологический ущерб окружающей среде, вызываемый выбросами углекислого газа при производстве цемента. Касаясь производства бетонов, в том числе и бетонов нового поколения следует отметить, что в современной



технологии интенсивно развивается направление создания многокомпонентных цементных материалов, модифицированных тонкодисперсными карбонатными материалами и комплексными органоминеральными добавками на основе супер- и гиперпластификаторов (СП и ГП), позволяющими направленно воздействовать на процессы структурообразования и твердения цементных растворов и бетонов и получать материалы с высокими физико-механическими свойствами.

В наполненных цементных системах оптимальные условия для активации процессов агломерации и срастания частиц могут быть достигнуты применением микронаполнителей различной природы и фракционного состава, уплотняющих структуру и заполняющих пустоты и полости. Для активации образования межчастичных контактов необходимыми условиями являются высокое пресыщение по фазообразующему веществу и сближение частиц для уменьшения гидрозора между ними, в этом случае между частицами, сближенными до минимальных расстояний места контактов могут являться активными зонами, связывающими кристаллы, образующиеся на поверхности частиц и сами частицы в агломераты.

В цементных системах, наполненных тонкодисперсными минеральными добавками, кристаллизация гидратов происходит как на частицах цемента, так и на частицах микронаполнителя и структура материала формируется в системе, состоящей из зерен цемента и микронаполнителей различных размеров, покрытых гидратными оболочками.

Основными топологическими характеристиками при исследовании гетерогенных цементных систем являются плотность упаковки элементов структуры, с учётом локальных скоплений и число элементов, находящихся в ближайшем окружении. Для наполненных цементных систем в процессе гидратации и твердения происходит непрерывное изменение состояния и топологии структуры. Эти параметры характеризуются развитием неупорядоченного структурообразования при кристаллизации в виде скоплений микро- и макрочастиц, наноструктур и флуктуаций плотности. Процесс изменения топологии цементных систем на наноуровне осложняется формированием гидратных фаз с различным кристаллическим строением (иглы, волокна, призмы, пластинки, кубические структуры и т.д.), вносящим определённую нестабильность и неупорядоченность в формирующуюся структуру. Кроме того, процессы перекристаллизации гидратов (например, метастабильных гидроалюминатов кальция) могут изменять топологию наноструктуры при изменении условий твердения (температуры, влажности и др.).

В отношении фазовых контактов между частицами следует отметить, что они определяются в зависимости от площади атомных перемычек. Однако, в этом случае характерно перераспределение атомов в ближайшей зоне, следствием чего является увеличение числа контактов. Слияние частиц возможно при

взаимодействии образований с размерами менее критического, за счёт большей подвижности сегментных участков.

В цементных материалах гидраты AFm, AFt и гелевая фаза являются основными элементами формирующейся системы, определяющими характер изменения структур на ранних этапах. В более поздний период основные физико-механические характеристики материала зависят от структуры и свойств гидросиликатной основы.

При рассмотрении механизмов повышения прочности наполненных цементных композиций, особенно при использовании тонкодисперсных химически активных наполнителей, особое внимание должно уделяться процессам гидратообразования, в конечном итоге обеспечивающим прочность твердеющих систем. Структурная топология цементного композита, однородно смешанного с микронаполнителем, если его дисперсность в 3-4 раза превышает дисперсность вяжущего, обеспечивает повышение прочности контактной зоны, за счёт увеличения количества межчастичных контактов, влияния капиллярных сил и уплотнения структуры.

При использовании в цементных системах тонкодисперсных минеральных добавок большее количество коагуляционных контактов и стесненные условия с равномерным распределением частиц наполнителя по объёму матрицы и заполнением пустот создают предпосылки для повышения ранней прочности композита. Подобный механизм структурного упрочнения, очевидно, может быть принят для тонкодисперсных наполнителей химически неактивных или слабоактивных по отношению к цементным минералам. При использовании карбонатных, гипсосодержащих и смешанных наполнителей, в том числе минеральных шламов в цементных системах, не исключая рассмотренного выше механизма формирования контактов и упрочнения, механизм повышения прочности необходимо рассматривать с учётом возможности химического взаимодействия тонкодисперсного наполнителя с цементными минералами.

В работе представлены результаты влияния карбонатного шлама на прочность цементно-песчаного раствора. Шлам вводился в количестве 5, 10 и 20% от массы цемента индивидуально и в смеси с суперпластификатором С-3. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Анализ полученных результатов свидетельствует о высокой эффективности применения шлама в составе цементно-песчаного раствора. Прочность в различные сроки твердения возрастает в среднем на 30-70% по сравнению с контрольным составом.

Применение карбонатных шламов в цементно-песчаных растворах может быть эффективно использовано с целью повышения прочности материала или с целью сокращения расхода цемента в среднем на 10-20%.



Таблица 1. Влияние карбонатного шлама на прочность цементно-песчаного раствора

| Состав                                           | Кол-во добавки, % от массы | Прочность, МПа     |                    |
|--------------------------------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|
|                                                  |                            | 14 сут             | 28 сут             |
| ЦЕМ32,5П/А<br>Ц:П=1:2<br>В/Ц=0,53<br>без добавки | -                          | 16,2               | 17,0               |
| с добавкой карбонатного шлама                    | 5                          | <u>23,1</u><br>143 | <u>28,4</u><br>167 |
| с добавкой карбонатного шлама                    | 10                         | <u>21,1</u><br>130 | <u>29,7</u><br>175 |
| с добавкой карбонатного шлама                    | 20                         | <u>19,6</u><br>121 | <u>29,9</u><br>176 |
| с добавкой карбонатного шлама<br>+С-3            | 10<br>0,5                  | <u>21,6</u><br>133 | <u>30,7</u><br>181 |
| с добавкой карбонатного шлама<br>+С-3            | 20<br>0,5                  | <u>18,7</u><br>116 | <u>24,3</u><br>143 |

Примечание: в числителе прочность, МПа, в знаменателе – в % по сравнению с контрольным составом.

Перспективным направлением в технологии высокопрочных бетонов является использование карбонатных и бинарных наполнителей. Бинарные и более сложные минеральные смеси позволяют в определенной степени нивелировать различный характер пластифицирующего действия супер- и гиперпластификаторов на разжижение цементно-минеральных систем и получать стабильно высокие прочности бетона (табл. 2).

Анализ результатов исследований показал высокую эффективность применения карбонатных и карбонатсодержащих микронаполнителей в технологии высокопрочных бетонов.

Таблица 2. Исследование физико-механических свойств реакционно-порошкового бетона на моно- и бинарном наполнителе

| Наименование компонентов бетона                             | Количество компонентов на 1 м <sup>3</sup> , кг | Водо-твердое отношение | Прочность бетона на изгиб и при одноосном сжатии, МПа, через |                         |                         |                         |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                                             |                                                 |                        | 1 сут.                                                       | 7 сут.                  | 14 сут.                 | 28 сут.                 |
| Цемент ЦЕМ32,5IA                                            | 668                                             | 0,112                  | R <sub>изг.</sub> =7,8                                       | R <sub>изг.</sub> =8,0  | R <sub>изг.</sub> =12,9 | R <sub>изг.</sub> =16,0 |
| ГП Melflux 5581                                             | 5,2                                             |                        | R <sub>сж.</sub> =74,4                                       | R <sub>сж.</sub> =101,0 | R <sub>сж.</sub> =108,0 | R <sub>сж.</sub> =114,4 |
| 0,8% от Ц                                                   |                                                 |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Доломит молотый                                             | 250                                             |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| S <sub>уд.</sub> =445 м <sup>2</sup> /кг                    |                                                 |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Известняковая мука S <sub>уд.</sub> =280 м <sup>2</sup> /кг | 84                                              | 0,121                  | R <sub>изг.</sub> =7,0                                       | R <sub>изг.</sub> =8,5  | R <sub>изг.</sub> =14,5 | R <sub>изг.</sub> =16,0 |
| Микрокремнезем                                              | 66                                              |                        | R <sub>сж.</sub> =40,8                                       | R <sub>сж.</sub> =84,5  | R <sub>сж.</sub> =98,8  | R <sub>сж.</sub> =99,6  |
| Песок тонкий фр. 0,16-0,63 мм                               | 1002                                            |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Вода                                                        | 233                                             |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Цемент ЦЕМ I                                                | 655                                             |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| ГП Melflux 5581                                             | 5,2                                             |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| 0,8% от Ц                                                   |                                                 |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Доломит молотый                                             | 327                                             |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| S <sub>уд.</sub> =445 м <sup>2</sup> /кг                    | 66                                              |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Микрокремнезем                                              | 982                                             |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Песок тонкий фр. 0,16-0,63 мм                               | 246                                             |                        |                                                              |                         |                         |                         |
| Вода                                                        |                                                 |                        |                                                              |                         |                         |                         |

Примечание: ГП – гиперпластификатор; микрокремнезем производства АО «Кузнецкие ферросплавы»;



**Библиографический список**

1. Тараканов, О. В. Гидратация и твердение цементных материалов с добавками минеральных шламов / О. В. Тараканов, Т. В. Пронина ; О. В. Тараканов, Т. В. Пронина; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Международная акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Пензенский гос. ун-т архитектуры и строительства". – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2006. – 150 с. – ISBN 5-9282-0379-9. – EDN QNMNJB.
2. Коренькова С.Ф., Шеина Т.В. Основы и концепция утилизации химических осадков  
промстоков в стройиндустрии. – Самара: изд-во Самарского гос. арх.-строит. ун-та, 2004. – 208 с.
3. Коренькова С.Ф., Шеина Т.В. Штукатурные и отделочные растворы из отходов промышленности // Сб. ВНИИЭСМ. Промышленность строительных материалов. Экспресс обзор. Сер. 2. Вып. 2. Использование отходов, попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. Охрана окружающей среды, М., 1991.
4. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. – М.: Издательство АСВ, 2021. – 366 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена после рецензирования 09.11.2023; принята к публикации 09.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 09.11.2023; accepted for publication 09.11.2023.



Научная статья

УДК 539.3

ГРНТИ: 30.19.17: Оболочки; 67 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела; 2.1.9. Строительная механика

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_125

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ МАТЕРИАЛА С ДВОЙНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© Авторы 2023

SPIN: 8966-7812

AuthorID: 453902

ORCID 0000-0001-8601-4021

ScopusID: 6507502084

ResearcherID: ABA-7387-2021

**ТРЕЩЁВ Александр Анатольевич**

член-корреспондент РААСН, доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой

*Российская академия архитектуры и строительных наук;*

*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: taa58@yandex.ru)*

SPIN: 2755-2105

**ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент

*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: katranv@yandex.ru)*

SPIN: 4577-7670

**СЕЛЕЗНЕВ Илья Романович**

аспирант

*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: il.seleznov@yandex.ru)*

**Аннотация.** Рассматривается тонкая полая сферическая оболочка с центральным отверстием, выполненная из материалов с двойной анизотропией, покоящаяся на упругом «винклеровом» основании. В рамках формализма Кармана, применяя гипотезы Киргхофа-Лява, с учетом уравнений состояния через потенциал деформаций в нормированном тензорном пространстве напряжений, построена математическая модель деформирования оболочки. Структурная анизотропия ограничена классом ортотропных материалов. Потенциал деформаций ограничен квадрикватичным разложением для данного класса анизотропии. В рамках апробации разработанной математической модели и ее программной реализации решена осесимметричная задача теории упругости, описывающая напряжённо-деформированное состояние оболочки, покоящейся на упругом основании, с центральным отверстием, выполненной из ортотропного разнсопротивляющегося материала. Оболочка нагружена внешним давлением в предположении малых прогибов. На основе полученных данных построены графики напряжений, прогибов и горизонтальных перемещений. Полученные результаты сравнены с результатами для теории с усреднёнными механическими характеристиками. Сделаны выводы об эффективности использования усовершенствованных соотношений.

**Ключевые слова:** тонкая оболочка; ортотропия; разнсопротивляемость; усложненные свойства материала; упругое основание; строительная механика; осесимметричная задача; метод конечных разностей; малые прогибы оболочки

**Для цитирования:** Трещёв А.А., Теличко В.Г., Селезнев И.Р. Деформирование сферической оболочки на упругом основании, выполненной из материала с двойной анизотропией // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 125-132. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_125





## DEFORMATION OF A SPHERICAL SHELL ON AN ELASTIC FOUNDATION MADE OF A DOUBLE ANISOTROPIC MATERIAL

© The Author(s) 2023

**TRESHCHEV Alexander Anatolyevich**

Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof.,  
Head of the Department

*Russian Academy of Architecture and Construction Sciences;  
Tula State University  
(Russia, Tula, e-mail: taa58@yandex.ru)*

**TELICHKO Victor Grigorievich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the  
Department

*Tula State University  
(Russia, Tula, e-mail: katranv@yandex.ru)*

**SELEZNEV Ilya Romanovich**

PhD Candidate

*Tula State University  
(Russia, Tula, e-mail: katranv@yandex.ru)*

**Abstract.** The article considers a thin-walled spherical shell with a central hole made of materials with double anisotropy, resting on an elastic "Winkler" foundation. Within the framework of the Kirchhoff-Love hypothesis and using the Karman formalism, a mathematical model of the shell deformation is constructed, taking into account the equations of state through the strain potential in the normalized tensor space of stresses. The structural anisotropy is limited to the class of orthotropic materials, and the strain potential is limited to quasi-quadratic expansion for this class of anisotropy. An axisymmetric problem of elasticity theory has been solved using the developed mathematical model and its software implementation, describing the stress-strain state of the shell with a central hole made of orthotropic materials with different resistances, resting on an elastic foundation, and subjected to external pressure assuming small deflections. Based on the obtained data, graphs of stresses, deflections, and horizontal displacements are constructed. The results are compared with those obtained using the theory of averaged mechanical characteristics. Conclusions have been drawn about the effectiveness of using improved relationships based on the analysis of the obtained results.

**Keywords:** thin shell; orthotropy; resistance variability; complex material properties; elastic foundation; axisymmetric problem; finite difference method; small deflections of the shell

**For citation:** Treshchev A.A., Telichko V.Gr., Seleznev I.R. Deformation of a spherical shell on an elastic foundation made of a double anisotropic material // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 125-132. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_125

### *Введение*

В настоящее время, когда промышленность и строительство стремительно развиваются, а человечество живет в условиях ограниченности ресурсов, возникает потребность в применении наименее материалоемких конструкций, при этом обеспечивающих требуемые прочностные и жесткостные характеристики. Благодаря этому, сегодня популярно применение в качестве конструкционных материалов полимеров и композитов, обладающих структурной анизотропией. На практике наиболее часто встречаются материалы с анизотропией класса ортотропии.

Также современные композитные материалы обладают более высокими прочностными характеристиками при усложнении их структуры,

что приводит к зависимости этих характеристик от реализуемого напряженного состояния. Это в большинстве случаев не вписывается в представления классических теорий деформирования и вопрос построения новых моделей весьма актуален [1-2].

Кроме того, работа многих ответственных строительных конструкций реализуется совместно с упругим основанием (фундаменты зданий и сооружений, трубопроводы на грунтовом основании, железнодорожные пути и др.). Согласно актуальным нормам проектирования оснований зданий и сооружений СП 22.13330.2016, сооружение и основание следует рассматривать в единстве, т.е. учитывать их взаимодействие. Игнорирование податливости основания может привести к существенному различию результатов расчёта и

реального напряженно-деформированного состояния конструкций, а в некоторых случаях и к возникновению аварийных ситуаций [3-5].

Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния конструкций со структурной и деформационной анизотропией, взаимодействующих с упругим основанием, а также построение новых, пригодных для решения прикладных инженерных задач расчётных моделей таких конструкций, является важной задачей современной механики. В данной работе построена модель и решена тестовая задача о взаимодействии оболочки с упругим основанием. Результаты, полученные на основе этой модели, показывают эффективность использования усовершенствованных определяющих соотношений для ортотропных разнородных материалов.

#### Система разрешающих уравнений

В представленной работе рассматривается напряженно-деформированное состояние пологой сферической оболочки с центральным отверстием, покоящейся на упругом основании (рис. 1). Главные радиусы кривизны ее срединной поверхности в пределах плана постоянны, геометрия срединной поверхности оболочки отождествляется с геометрией на плоскости. Главные кривизны оболочки равны  $k_1 = k_2 = k = 1/R$  [6].

Оболочка принята достаточно тонкой, чтобы использовать традиционные для подобных задач гипотезы Кирхгофа-Лява:

1) нормаль к срединной поверхности после деформации остается перпендикулярной к этой поверхности в деформированном состоянии;

2) при определении параметров напряженного состояния влиянием нормальных напряжений  $\sigma_z$  можно пренебречь, где  $z$  – ось, перпендикулярная плану оболочки.

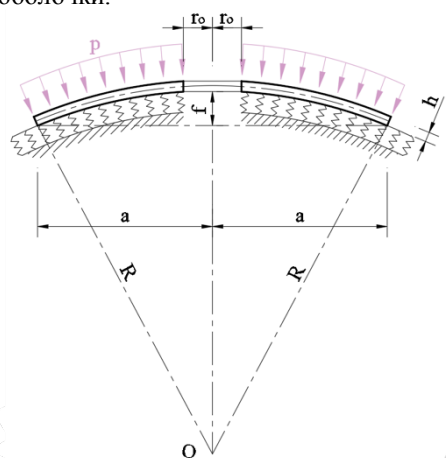


Рис. 1. Схема оболочки

Геометрические параметры оболочки обозначены следующим образом: радиус контура в плане  $a$  (м); стрела подъема  $f$  (м); толщина  $h$  (м).

Срединная поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом кривизны  $R$  (м). В центре оболочки присутствует отверстие радиусом  $r_0$  (м). Оболочка загружена равномерно распределенной поперечной нагрузкой  $p$  (МПа).

Согласно теории пологих оболочек, кинематические соотношения для рассматриваемой оболочки формулируются следующим образом:

а) компоненты деформации в срединной поверхности приняты согласно теории Т. Кармана [7]:

$$\varepsilon_r = u_r - kw; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} - kw \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  – удлинения;  $u, w$  – радиальные перемещения и прогибы;  $k$  – главная кривизна оболочки;  $r$  – радиальная координата;

б) компоненты изгибной деформации:

$$\chi_r = -w_{,rr}; \quad \chi_\theta = -\frac{w_{,r}}{r}; \quad (2)$$

в) компоненты тензора деформаций выражаются через параметры деформации  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  и кривизны  $\chi_r, \chi_\theta$  срединной поверхности:

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r; \quad e_\theta = \varepsilon_\theta + z\chi_\theta, \quad (3)$$

где  $z$  – вертикальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки.

Подставляя в уравнения (3) соотношения (1) и (2), получим выражения компонентов тензора деформаций через перемещения и прогибы:

$$e_r = u_{,r} - kw - zw_{,rr};$$

$$e_\theta = \frac{u_r}{r} - kw - z\frac{w_{,r}}{r}. \quad (4)$$

В качестве физических зависимостей использованы определяющие уравнения деформирования материалов с двойной анизотропией, основанные на экспериментальных данных по деформированию анизотропных разнородных сред, построенные в нормированном пространстве тензора напряжений и предложенные в работе [8]:

При совпадении осей сферической системы координат с главными осями анизотропии и с учётом принятых гипотез физические зависимости записываются в виде:

$$e_r = K_{11}\sigma_r + K_{12}\sigma_\theta$$

$$e_\theta = K_{21}\sigma_r + K_{22}\sigma_\theta \quad (5)$$



где

$$\begin{aligned} K_{11} &= (A_{1111} + B_{1111}\alpha_r) + 0,5B_{1111}\alpha_r(1 - \alpha_r^2) \\ &\quad - B_{2222}\alpha_\theta^3 + B_{1122}\alpha_\theta(1 - \alpha_r^2 - \alpha_r\alpha_\theta); \\ K_{12} &= K_{21} = A_{1122} + B_{1122}(\alpha_r + \alpha_\theta); \\ K_{22} &= (A_{2222} + B_{2222}\alpha_\theta) + \\ &\quad + 0,5[B_{2222}\alpha_\theta(1 - \alpha_\theta^2) - B_{1111}\alpha_r^3] + \\ &\quad + B_{1122}\alpha_r(1 - \alpha_\theta^2 - \alpha_r\alpha_\theta). \end{aligned} \quad (6)$$

где  $A_{kkkk}$ ,  $B_{kkkk}$ ,  $A_{ijij}$ ,  $B_{ijij}$  – константы потенциала, зависящие от модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации материала при растяжении и сжатии;  $\alpha_r = \sigma_r/S$ ,  $\alpha_\theta = \sigma_\theta/S$  – нормированные напряжения;  $S = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2}$  – модуль вектора полных напряжений.

Значения констант потенциала  $A_{kkkk}$ ,  $B_{kkkk}$ ,  $A_{ijij}$ ,  $B_{ijij}$  выражаются через технические характеристики следующим образом [8]:

$$\begin{aligned} A_{kkkk} &= (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2; \\ B_{kkkk} &= (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2; \\ A_{ijij} &= -(v_{ij}^+/E_j^+ + v_{ij}^-/E_j^-)/2; \\ B_{ijij} &= -(v_{ij}^+/E_j^+ - v_{ij}^-/E_j^-)/2. \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразуем физические зависимости (5):

$$\begin{aligned} \sigma_r &= C_{11}e_r + C_{12}e_\theta; \\ \sigma_\theta &= C_{12}e_r + C_{22}e_\theta; \end{aligned} \quad (8)$$

где  $C_{11} = K_{22}/\Delta$ ;  $C_{12} = -K_{12}/\Delta$ ;  $C_{22} = -K_{11}/\Delta$ ;  $\Delta = K_{11}K_{22} - K_{12}^2$ .

Выражения для усилий и моментов через напряжения:

$$\begin{aligned} N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; \quad N_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz; \\ M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; \quad M_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta z dz. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя напряжения (8) в выражения усилий (9) и учитывая компоненты тензора деформаций (4), запишем внутренние усилия через перемещения:

$$\begin{aligned} N_r &= -w_{,rr}F_{11} - kw_rD_{11} - kw_rD_{12} + u_rD_{11} + \\ &\quad + (u_rD_{12} - w_{,r}F_{12})/r; \\ N_\theta &= -w_rkD_{22} - w_{,rr}F_{12} - kw_rD_{12} + u_rD_{12} + \\ &\quad + (u_rD_{22} - w_{,r}F_{22})/r; \\ M_r &= -w_{,rr}P_{11} - kw_rF_{11} - kw_rF_{12} + u_rF_{11} + \\ &\quad + (u_rF_{12} - w_{,r}P_{12})/r; \\ M_\theta &= -w_rkF_{22} - w_{,rr}P_{12} - kw_rF_{12} + u_rF_{12} + \\ &\quad + (u_rF_{22} - w_{,r}P_{22})/r; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{где } D_{ij} = \int C_{ij} dz; \quad F_{ij} = \int C_{ij} z dz; \quad P_{ij} = \int C_{ij} z^2 dz.$$

Принимая за основу те или иные определяющие соотношения, мы не вносим изменений в соотношения статико-геометрической природы. Поэтому остаются справедливыми положения и зависимости теории анизотропных оболочек [9]. Внутренние усилия и моменты приводятся к срединной поверхности  $z=0$ , и при условии  $zk \ll 1$  уравнения равновесия для пологих сферических оболочек принимают вид:

$$\begin{aligned} M_{r,rr} - M_{\theta,rr}/r + 2M_{r,r}/r + \\ + k(N_r + N_\theta) + N_r w_{,rr} = -q; \\ N_{r,r} + (N_r - N_\theta)/r - \\ - k[M_{r,r} + (M_r - M_\theta)/r] = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

В качестве модели упругого основания примем модель Винклера [10]. Согласно этой модели, зависимость между реактивным отпором основания и осадкой его поверхности предполагается линейной и записывается в виде функции:

$$r_{on} = k_w w_r, \quad (12)$$

где  $r_{on}$  – интенсивность реакции упругого основания,  $k_w$  – коэффициент отпора основания (коэффициент постели),  $w_r$  – величина прогиба.

Тогда, с учетом упругого основания, полная интенсивность нагрузки на оболочку определяется суммой давлений:

$$q = p - r_{on} = p - k_w w_r, \quad (13)$$

где  $p$  – нагрузка на оболочку (МПа),  $r_{on}$  – интенсивность реакции упругого основания (МПа),  $k_w$  – коэффициент отпора основания (МН/м<sup>3</sup>),  $w_r$  – величина прогиба (м).

С учетом выражения (13), уравнения равновесия (11) для рассматриваемой пологой сферической оболочки на упругом основании примут вид:

$$\begin{aligned} M_{r,rr} - M_{\theta,rr}/r + 2M_{r,r}/r + \\ + k(N_r + N_\theta) + N_r w_{,rr} = -p + k_w w; \\ N_{r,r} + (N_r - N_\theta)/r - \\ - k[M_{r,r} + (M_r - M_\theta)/r] = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя выражения для усилий и моментов (10) в уравнения равновесия (14), получаем систему разрешающих дифференциальных уравнений относительно прогибов и радиальных перемещений.

Первое уравнение системы:

$$\begin{aligned}
 & -kw_{,rr}F_{12} - kw_rF_{12,r} + (2w_{,rr}P_{12}/r - \\
 & -w_{,rrr}P_{12} - 2w_{,rr}P_{12,r} - 2w_{,r}P_{12,rr} + \\
 & +u_{,rr}F_{12} + u_rF_{12,rr})/r + 2w_{,r}w_{,rr}F_{11,r} + \\
 & +w_{,r}w_{,rrr}F_{11,rr} - kw_rF_{11,rr} - kw_{,rr}F_{11} - \\
 & -2kw_{,r}F_{12,r} - 2kw_{,r}F_{11,r} + \{2u_{,r}F_{12,r} + \\
 & [2w_{,r}P_{12,r} - 2u_rF_{12} - 2u_rF_{12,r} + \\
 & + (2u_rF_{12} - 2w_{,r}P_{12})/r]/r\}/r + \\
 & +w_{,rr}^2F_{11} + k[-w_{,rr}F_{11} - kwD_{11} + \\
 & +0,5w_{,r}^2D_{11} - 2kw_rD_{12} + u_rD_{11} - \\
 & - (w_{,r}F_{12} + u_rD_{12} - w_{,r}F_{22} + u_rD_{22})/r - \\
 & - kw_rD_{22} - w_{,rr}F_{12} + 0,5w_{,r}^2D_{12} + u_rD_{12}] \\
 & +w_{,rr}[w_{,rr}F_{11} - kw_rD_{11} + 0,5w_{,r}^2D_{11} + kw_rD_{12} \\
 & + u_rD_{11} - (w_{,r}F_{12} + u_rD_{12})/r] - w_{,rrr}P_{11} - \\
 & - 2w_{,rrr}P_{11} - w_{,rr}P_{11,rr} + 0,5w_{,r}^2F_{11,rr} + u_{,rr}F_{11} \\
 & + u_rF_{11,rr} - \{-kw_{,rr}F_{22} - kw_rF_{22,r} - w_{,rrr}P_{12} \\
 & - w_{,rr}P_{12,r} - kw_rF_{12} - kw_rF_{12,r} + \\
 & +w_{,r}w_{,rr}F_{12} + 0,5w_{,r}^2F_{12,r} + u_{,r}F_{12} + u_rF_{12,r} + \\
 & + [u_{,r}F_{22} + u_rF_{22,r} - w_{,rr}P_{22} - \\
 & - w_{,r}P_{22,r} - (u_rF_{22} + w_{,r}P_{22})/r]/r\}/r + \\
 & + \{2 \cdot [w_{,rrr}P_{11} - w_{,rr}P_{11,r} - w_{,r}F_{11} - \\
 & - kw_rF_{11,r} + w_{,r}w_{,rr}F_{11} + 0,5w_{,r}^2F_{11} - \\
 & - kw_{,r}F_{12} - kw_{,r}F_{12,r} + u_{,r}F_{11} + u_rF_{11,r} + \\
 & + w_{,r}P_{12}/r^2 - (w_{,rr}P_{12} - w_{,r}P_{12,r} + \\
 & + u_{,r}F_{12} + u_rF_{12,r} + u_rF_{12}/r)/r\}/r + \\
 & + 2u_{,r}F_{11,r} - kw_r = -p;
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

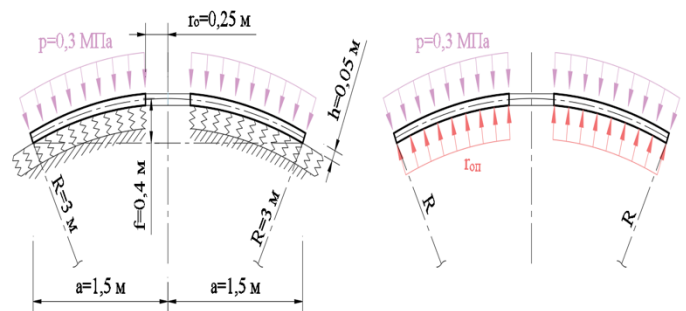
Второе уравнение:

$$\begin{aligned}
 & -w_{,rrr}F_{11} - w_{,rr}F_{11} - kw_{,r}D_{11} - kw_rD_{11} + \\
 & +w_{,r}w_{,rr}D_{11} + 0,5w_{,r}^2D_{11} - kw_{,r}D_{12} - \\
 & - kw_rD_{12,r} + u_{,r}D_{11} + u_rD_{11} + [u_{,r}D_{12} + u_rD_{12,r} - \\
 & - w_{,rr}F_{12} - w_{,r}F_{12} + (w_{,r}F_{12} - u_rD_{12})/r]/r + \\
 & + [-w_{,rr}F_{11} - kw_rD_{11} + 0,5w_{,r}^2 + u_rD_{11} + kw_rD_{12} + \\
 & + kw_rD_{22} + w_{,rr}F_{12} - 0,5w_{,r}^2D_{12} - u_rD_{12} + \\
 & + (w_{,r}F_{22} - w_{,r} + u_rD_{12} - u_rD_{22})/r]/r - \\
 & - k\{-w_{,rrr}P_{11} - w_{,rr}P_{11} - kw_{,r}F_{11} - kw_rF_{11,r} + \\
 & +w_{,r}w_{,rr}F_{11} + 0,5w_{,r}^2F_{11,rr} - kw_{,r}F_{12} - kw_rF_{12,r} \\
 & + u_{,r}F_{11} + u_rF_{11,r} + [u_{,r}F_{12} + u_rF_{12,r} - w_{,rr}P_{12} - \\
 & - w_{,r}P_{12,r} + (w_{,r}P_{12} - u_rF_{12})/r]/r + \\
 & + [w_{,rr}P_{11} - kw_rF_{11} + 0,5w_{,r}^2F_{11} + u_rF_{11} + \\
 & + (u_rF_{12} + w_{,r}P_{22} - u_rF_{22} - w_{,r}P_{12})/r + \\
 & + kw_rF_{22} + w_{,rr}P_{12} - 0,5w_{,r}^2F_{12} - u_rF_{12}]/r\} = 0.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

где  $D_{ij}, F_{ij}, P_{ij}$  – функции, зависящие от принятых физических зависимостей для ортотропных материалов.

#### Постановка задачи

В качестве тестовой задачи для апробации разработанной математической модели была рассчитана оболочка толщиной оболочки  $h = 0,05$  м; радиусом в плане  $a = 1,5$  м; стрелой подъема  $f = 0,4$  м, радиусом отверстия  $r_0 = 0,25$  м. Срединная поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом кривизны  $R = 3$  м. Форма и размеры оболочки приведены на рисунке



2.

Рис. 2. Схема оболочки для решения тестовой задачи

Для решения полученной системы разрешающих дифференциальных уравнений относительно прогибов и радиальных перемещений использован метод конечных разностей [11], наиболее просто реализуемый численный метод для данной задачи.

Для построения конечно-разностной схемы радиус оболочки при помощи 200 точек разбит на 199 отрезков. В рамках проведенной конечно-

разностной аппроксимации производных получены конечно-разностные аналоги для центральных, контурных и предконтурных точек, и, затем, внесены в систему дифференциальных уравнений с учетом узлов сетки, образуя тем самым систему линейных алгебраических уравнений.

Для решения тестовой задачи полученная система уравнений дополняется граничными условиями. Края центрального отверстия и внешнего контура принимаются свободными, поэтому в крайних точках центрального отверстия и по внешнему контуру изгибающий момент, продольное усилие и поперечная сила равны нулю:

$$N_r = 0; M_r = 0; Q_r = 0; \quad (17)$$

В качестве материала оболочки принят стеклопластик со следующими механическими характеристиками [11]: модули упругости –  $E_1^+ = 140$  ГПа,  $E_1^- = 70$  ГПа,  $E_2^+ = 280$  ГПа,  $E_2^- = 140$  ГПа; коэффициенты поперечной деформации –  $\nu_{12}^+ = 0,2$ ,  $\nu_{12}^- = 0,3$ .

При нагружении оболочки принято внешнее давление, равное 0,3 МПа.

Оболочка покоится на упругом основании, коэффициент постели равен 125 МН/м<sup>3</sup>.

## Анализ полученных результатов

Решение произведено с помощью пакета прикладных программ MATLAB.

Результаты, полученные на основе разработанной модели с использованием усовершенствованных соотношений, сравнивались с результатами решения этой же задачи с усредненными характеристиками материала на растяжение/сжатие. Сравнения основных из этих

| Результаты                                                 | Предложенная модель с использованием усовершенствованных соотношений | Модель с использованием усредненных механических характеристик | Расхождение |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| Вертикальные перемещения $w$ в срединной плоскости         | $10,34 \cdot 10^{-3}$ м                                              | $13 \cdot 10^{-3}$ м                                           | 20,5%       |
| Напряжения $\sigma_\theta$ на нижней поверхности оболочки  | 7,95 МПа                                                             | 9,11 МПа                                                       | 12,7%       |
| Напряжения $\sigma_r$ на нижней поверхности оболочки       | 5,80 МПа                                                             | 6,79 МПа                                                       | 14,6%       |
| Напряжения $\sigma_r$ на верхней поверхности оболочки      | -7,02 МПа                                                            | -8,19 МПа                                                      | 14,3%       |
| Напряжения $\sigma_\theta$ на верхней поверхности оболочки | 4,69 МПа                                                             | 6,17 МПа                                                       | 24,0%       |

результатов приведены в таблице 1. Сравнения двух моделей проводились для максимальных величин.

## Таблица 1. Сравнение результатов расчёта

Ниже приведены наиболее значимые результаты в форме графиков распределения прогибов  $w$  в срединной плоскости и напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_r$  на нижней и верхней поверхности оболочки. На приведенных графиках полученные результаты с использованием усовершенствованных соотношений для ортотропных материалов (синяя линия) представлены совместно с результатами для материала с усредненными механическими характеристиками (красная линия).

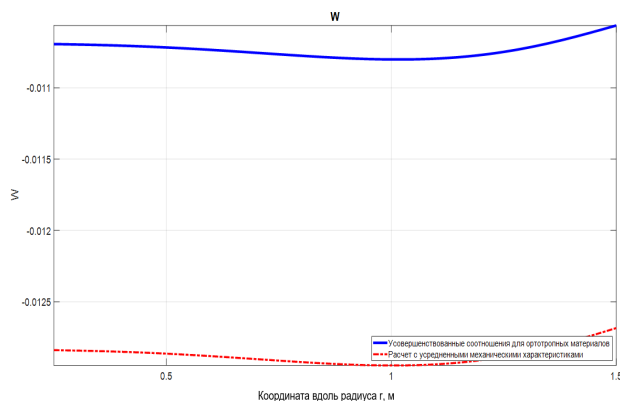


Рис. 3. Вертикальные перемещения в срединной плоскости оболочки

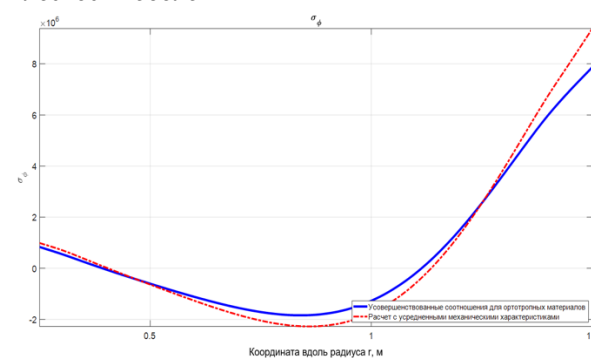


Рис. 4. Напряжения  $\sigma_\theta$  на нижней поверхности оболочки

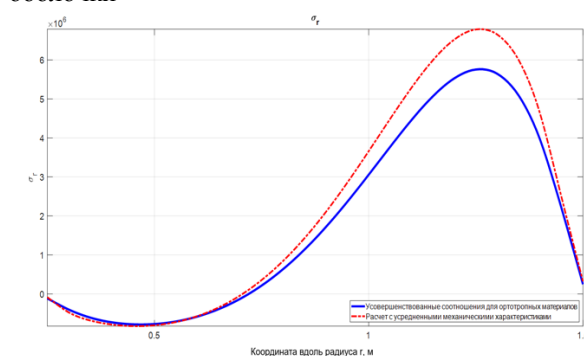


Рис. 5. Напряжения  $\sigma_r$  на нижней поверхности оболочки

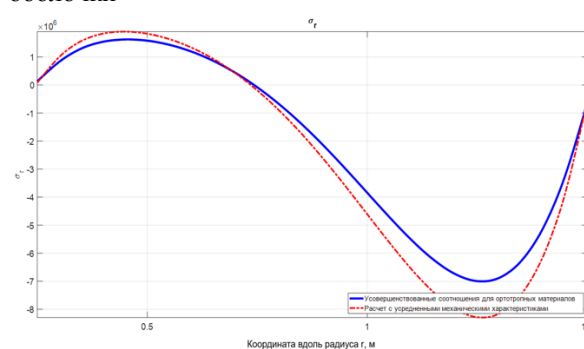


Рис. 6. Напряжения  $\sigma_r$  на верхней поверхности оболочки

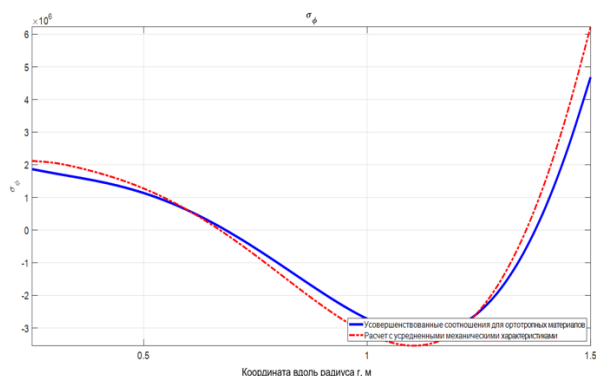


Рис. 7. Напряжения  $\sigma_\theta$  на верхней поверхности оболочки

#### Выводы

Таким образом, была разработана математическая модель, описывающая напряженно-деформированное состояние пологой сферической оболочки с отверстием, выполненной из ортотропных разносопротивляющихся материалов, взаимодействующей с упругим «винклеровым» основанием. Базой построенной модели являются усовершенствованные соотношения для ортотропных разносопротивляющихся материалов, приведенные в работе [8]. На основе предложенной модели разработана программа, позволявшая решить тестовую задачу и получить результаты в виде графиков распределения прогибов и напряжений.

Из анализа результатов решения тестовой задачи об определении напряженно-деформированного состояния пологой сферической оболочки на упругом основании можно сделать вывод, что использование усовершенствованных определяющих соотношений для материала дает существенные уточнения результатов расчёта. При использовании же усредненных механических характеристик материала результаты расчёта прогибов срединной поверхности оболочки завышаются вплоть до 20,5%, напряжения на нижней поверхности оболочки – до 14,6%, а напряжения на верхней поверхности – до 24%.

Отметим, что для вертикальных перемещений существенное различие результатов наблюдается равномерно по всему радиусу оболочки, а для напряжений на нижней и верхней поверхностях оболочки – в местах их экстремальных значений.

#### Библиографический список

1. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности разносопротивляющихся материалов. – Тула: ТулГУ, 2020. – 359 с.
2. Трещев А.А., Монастырев Ю.А., Чибрикина В.Д., Завьялова Ю.А., Лапшина М.А. / Описание деформирования ортотропных разносопротивляющихся материалов //

- Строительная механика и конструкции. – 2019. – №1 (20). – С. 7–13.
3. Власов, В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. – М.: Физматгиз, 1960. – 491 с.
4. Bosakov, S. Development of the Theory of Computation of Pivotaly-Connected Beams on an Elastic Foundation Taking into Account Their Physical Nonlinearity / S. Bosakov, O. Kozunova // Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete. – 2019. – No. 11. – P. 11-24.
5. Beskopylny, A. Bending of a wavy plate of a periodic profile on an elastic foundation / A. Beskopylny, E. Kadomtseva, G. Strelnikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 21, Construction - The Formation of Living Environment, Moscow, 25–27 апреля 2018 года. Vol. 365. – Moscow, 2018. – P. 042032.
6. Доннел, Л.Г. Балки, пластины и оболочки / Л.Г. Доннел – М.: Наука, 1984. – 440 с.
7. Karman, Th. Festigkeitsprobleme in Maschinenbau. Enzyklopadie der Mathematischen Wissenschaften. Bd IV. Mechanik, Teilband 4, Hft 3, Art 27, Punkt 8. Ebene Flatten. Leipzig: B. G. Teubner. – 1910. – Pp. 311-385.
8. Трещев А.А., Завьялова Ю.А., Лапшина М.А., Гвоздев А.Е., Кузовлева О.В., Крупицын Е.С. Математические определяющие уравнения деформирования материалов с двойной анизотропией // Чебышевский сборник. 2021;22(4). С. 370-384.
9. Трещев, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев. – М.: РААСН; Тула: ТулГУ, 2007. - 160 с.
10. Черкасов, И.И. Механические свойства грунтовых оснований / И.И. Черкасов. -М.: Науч-техн. изд-во Автотрансиздат, - 1958. – 156 с.
11. Варвак П. М., Варвак Л.П. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций. - М.: Стройиздат, 1977. 154 с.
12. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещев. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 326 с.
13. Грин А. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды / А. Грин, Дж. Адкинс. – М.: Мир, 1965. – 456 с.
14. Трещев А.А. Определяющие соотношения для нелинейных анизотропных материалов,



чувствительных к виду напряженного состояния / А.А. Трещев, Д.А. Ромашин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – №4. Часть 4. – С. 1740-1742.

15. Трещев А.А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 4-1 (324). – С. 71 – 74.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 01.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.





Научная статья  
УДК 691.327  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_133

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ГРУНТОВ В ГЕОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ<sup>1</sup>

© Авторы, 2023  
ORCID: 0000-0002-3850-4285

**ХАРЧЕНКО Алексей Игоревич**  
кандидат технических наук, доцент  
*Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет  
(Россия, Москва)*

SPIN: 3825-6514  
AuthorID: 43534  
ORCID: 0000-0003-0874-316X  
ResearcherID: K-7539-2018

**ХОЗИН Вадим Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель  
науки РФ и РТ, Почетный работник высшего  
профессионального образования РФ  
*Казанский государственный архитектурно-строительный  
университет  
(Россия, Казань, e-mail: khozin.vadim@yandex.ru)*

AuthorID: 815775

**ХАРЧЕНКО Игорь Яковлевич**  
доктор технических наук, профессор  
*Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет  
(Россия, Москва)*

SPIN-код: 1792-3020

**ПISKУНОВ Александр Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Мосты и тоннели»  
*Российский университет транспорта (МИИТ)  
(Россия, Москва)*

**Аннотация.** Работа рассматривает проблемы строительства подземных сооружений различного назначения, предполагающего разработку и реализацию эффективных строительных материалов и технологий по уплотнению и упрочнению грунтов. На текущий момент актуальна замена строительного портландцемента на бесклинкерное вяжущее, что обладает значительным резервом повышения технико-экономической эффективности работ по уплотнению и упрочнению грунтов по технологии струйной цементации. Так же целесообразность замены строительного портландцемента на бесклинкерное вяжущее обусловлено тем, что грунтовые воды, в условиях плотной городской застройки, обладают повышенной агрессивностью по отношению к общестроительным цементам и, наоборот, могут быть дополнительным активирующим фактором при применении бесклинкерных вяжущих.

В результате выполненных исследований установлены основные закономерности влияния соотношения компонентов на свойства геополимерных вяжущих (ГПВ) и инъекционных смесей на их основе. Применение ГПВ в геотехническом строительстве является существенным вкладом в технологию «зелёного строительства», являясь альтернативой применения общестроительных цементов.

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



**Ключевые слова:** строительные материалы; зеленое строительство; геополимерные вяжущие; геотехническое строительство; уплотнение и упрочнение грунтов

**Для цитирования:** Харченко А.И., Хозин В.Г., Харченко И.Я., Пискунов А.А. Применение геополимерных вяжущих для уплотнения и упрочнения грунтов в геотехническом строительстве // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С.133-139. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_133

Original article

## APPLICATION OF GEO-DIMENSIONAL BINDERS FOR COMPACTING AND HARDENING SOILS IN GEOENGINEERING

© The Author(s) 2023

**KHARCHENKO Alexey Igorevich**

candidate of technical sciences, associate professor  
*National Research Moscow State University of Civil Engineering  
(Russia, Moscow)*

**KHOZIN Vadim Grigorievich**

doctor of technical sciences, professor  
*Kazan State University of Architecture and Civil Engineering  
(Russia, Kazan, e-mail: khazin.vadim@yandex.ru)*

**KHARCHENKO Igor Yakovlevich**

doctor of technical sciences, professor  
*National Research Moscow State University of Civil Engineering  
(Russia, Moscow)*

**PISKUNOV Alexander Alekseevich**

doctor of technical sciences, professor  
*Federal State Institution of Higher Education "Russian University of  
Transport" (MIIT) (Russia, Moscow)*

**Abstract.** The work considers the problems of the construction of underground structures for various purposes, including the development and implementation of effective building materials and technologies for compaction and hardening of soils. At present, the substitution of construction Portland cement with clinker-free cement holds significance, as it has the potential to enhance the technical and economic efficacy of sealing and hardening soils through the utilization of blasting cement technology. Also, it is important to replace Portland cement construction with clinker-free cement because groundwater is more aggressive than general construction cement in dense urban development and can be an additional activation factor when using clinker-free binders. The main regularities of the influence of the component ratio on the properties of geo-polymeric binders (GPB) and injection mixtures on their basis have been established as a result of the carried out studies. A significant contribution to the technology of "green construction" is the application of GPB in geotechnical construction as an alternative to the use of general construction cements.

**Keywords:** building materials; green construction; geo-polymeric binders; geotechnical construction; compaction and hardening of soils

**For citation:** Kharchenko A.I., Khozin V.G., Kharchenko I.Ya., Piskunov A.A. Application of geo-dimensional binders for compacting and hardening soils in geoenvironmental engineering // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 133-139. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_133

### Введение

Повышение качества проживания в условиях плотной городской неразрывно связано с освоением их подземного пространства, что обеспечивает развитие транспортных коммуникаций, формирование оптимальных условий труда, быта и отдыха населения, улучшение уровня комфортности окружающей среды. Строительство подземных

сооружений различного назначения предполагает разработку и реализацию эффективных строительных материалов и технологий по уплотнению и упрочнению грунтов. В настоящее время на строительном рынке, при освоении подземного пространства, достаточно широкое применение получили различные технологии инъекционного закрепления грунтов с применением



минеральных вяжущих, среди которых наибольшей востребованностью пользуется технология струйной цементации грунтов, а также закрепление грунтов по манжетной технологии в режиме пропитки их структуры. Каждая из выше названных технологий цементации имеет оптимальную область применения при решении тех или иных геотехнических задач, с учётом конкретных геологических условий. При этом, расход цемента составляет 450...900 кг/кб.м закрепляемого грунта в зависимости от проектных требований и геотехнических условий строительства. В этой связи, замена строительного портландцемента на бесклинкерное вяжущее является значительным резервом повышения технико-экономической эффективности работ по уплотнению и упрочнению грунтов по технологии струйной цементации. Кроме того, целесообразность замены строительного портландцемента на бесклинкерное вяжущее обусловлено тем, что грунтовые воды, в условиях плотной городской застройки, обладают повышенной агрессивностью по отношению к общестроительным цементам и, наоборот, могут быть дополнительным активирующим фактором при применении бесклинкерных вяжущих.

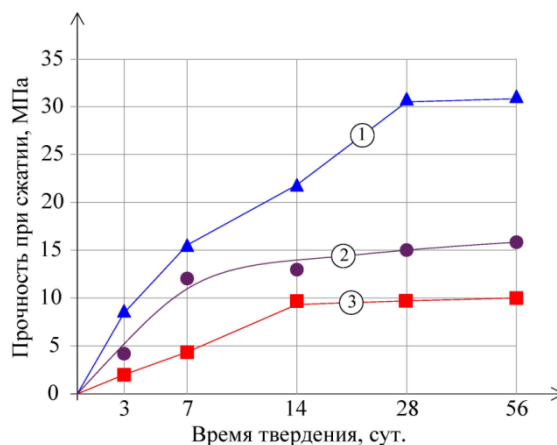
Характерным видом бесклинкерных вяжущих являются шлакощелочные вяжущие, теоретические основы применения которых в строительстве изложены в трудах Глуховского В.Г., Кривенко П.И., Калашникова В.И. [1-4]. Дальнейшее развитие создание и использование вяжущих, активированных щелочами, получило в трудах французского ученого Davidovits J., который внёс значительный вклад в разработку разновидности минеральных бесклинкерных вяжущих и предложил использовать термин «геополимер» [4-6]. Обоснованность применения этого термина обусловлена тем, что технология геополимерных вяжущих (ГПВ) предусматривает синтез их полимерной структуры из мономерных силикатных и алюминатных групп. Эти мономеры образуются путём химического разрушения щелочными растворами первичной структуры природных материалов или промышленных отходов алюмосиликатного состава, с последующим развитием процесса самопроизвольной пространственной полимеризации мономеров в пространственную структуру, которая со временем преобразуется в искусственный высокопрочный камень [7-8].

Несмотря на очевидную технико-экономическую эффективность ГПВ и бетонов на их основе, их применение в строительной практике сдерживается двумя основными факторами: неудовлетворительная воспроизводимость строительно-технологических свойств вследствие колебания химического и минерального состава как минеральной составляющей, так и щелочного активатора; выделение на поверхности строительных конструкций свободной щелочи в виде потеков, что

существенно ухудшает внешний вид конструкций [9-11]. Указанные недостатки не являются факторами, сдерживающими применение ГПВ для упрочнения и уплотнения грунтов и формирования грунтобетонных массивов. Негативное влияние возможного колебания составов компонентов на свойства ГПВ, в геотехническом строительстве нивелируется необходимостью получения, как правило, низкопрочных грунтобетонных массивов с прочностью при сжатии, не превышающей 10 Мпа, а также отсутствием возможности образования высолов на поверхности грунтобетонных массивов.

#### Экспериментальные исследования

Исследование свойств ГПВ выполнялось на тесте нормальной густоты с  $V/C = 0,31$ . Применяемый, при проведении исследований метакраин, получали путём обжига каолиновой глины при  $T=750$  °С. В качестве щелочного активатора использовался водный раствор NaOH. Расход щелочного активатора изменялся в количестве 5%; 15,0 % и 25% от массы вяжущего. В качестве замедлителя схватывания инъекционной смеси применялась НТФ-кислота с 50% концентрацией, плотностью 1,24 и основностью  $pH=1,82$ . Расход замедлителя назначался в количестве 0,05 ; 0,2; 0,8% от расхода вяжущего. С целью дополнительной активации процессов



гидратации, в состав ГПВ вводился микрокремнезём в количестве 1...5% от массы метакраина. Результаты исследования влияния соотношения компонентов на активность ГПВ представлены на рис.1 и рис.2.

Рис. 1: Кинетика затвердевания ГПВ в зависимости от расхода щелочного активатора: состав ГПВ-метакраин (95%) +микрокремнезём (5%); 1, 2 и 3 – содержание NaOH соответственно 5%; 15%; 25%

Как видно из представленных рисунков основным фактором, определяющим интенсивность затвердевания и конечную прочность ГПВ, является содержание щелочного активатора в его составе. При увеличении расхода щелочного активатора с 5% до 25%, прочность при сжатии ГПВ увеличивается с 10 Мпа до 34 Мпа, что особенно важно учитывать при

проектировании инъекционных смесей, которые при манжетной технологии применяются с высоким водовязующим отношением до 3,0. Введение в состав ГПВ микрокремнезёма сопровождается существенным приростом прочности при сжатии (Рис.2).

Так, при увеличении содержания микрокремнезёма с 1% до 5% в составе ГПВ, прочность при сжатии увеличивается на 15...30%. Причём, эффективность введения в состав ГПВ микрокремнезёма возрастает с увеличением расхода щелочного активатора.

Это можно объяснить тем, что в щелочной среде происходит химическое разрушение алюмосиликатных минералов с образованием алюминатных и силикатных анионов, из которых затем формируется трехмерная полимерная структура. При этом, щелочные катионы компенсируют отрицательные заряды, создаваемые тетраэдрами оксидов алюминия и кремния. Формируемый таким образом алюмосиликатный каркас обладает достаточно высокой прочностью, водостойкостью и устойчивостью в различных агрессивных средах. Кинетика затвердевания геополимерных систем определяется интенсивностью растворения алюмосиликатных материалов [12-13]. Установлено, что микроструктура геополимера, полученного щелочной активацией метакаолина, представляет собой однородную структуру, отличается высокой плотностью и однородностью.

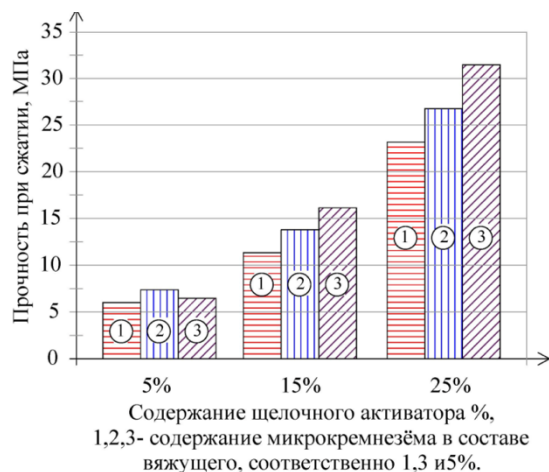


Рис.2: Влияние соотношения щелочного активатора и микрокремнезёма на прочность ГПВ

Из представленных результатов исследований видно, что наиболее эффективным способом повышения активности ГПВ является повышение концентрации щелочного активатора. Кроме того, значительно улучшить свойства ГПВ позволяет введение в их состав суспензии микрокремнезёма. Эта добавка не только ускоряет твердение ГПВ, но и обеспечивает повышенную плотность и непроницаемость структуры после завершения процесса структурообразования. На основании анализа результатов физико-химических исследований установлено, что повышение прочности и улучшение других характеристик,

вязущих происходит вследствие образования продуктов гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

Твердение таких вязущих происходит по ионно-диффузионному сквозьрастворному механизму массопереноса продуктов гидратации в ионной форме [13-15]. При воздействии щелочной среды на кремнезем образуется гель кремниевой кислоты, способствующий связыванию и упрочнению системы. Прочность ГПВ после 28 суток твердения находится в пределах 25...38 МПа, в зависимости от соотношения компонентов.

В результате выполненных исследований получены ГПВ со следующими показателями:

- прочность на сжатие в возрасте 28 сут – 15...38 МПа;
- прочность при изгибе в возрасте 28 сут – 2,8...3,5 МПа;
- модуль упругости – 1,2...1,6 ГПа;
- водопоглощение – 2,1...3,2 %.

При исследовании технологии и свойств инъекционных смесей на основе разработанных составов ГПВ для геотехнического строительства исследовалось влияние водо-вязущего отношения, а также соотношения компонентов на вязкость и седиментационную устойчивость инъекционных смесей и прочность сформированных грунтобетонных массивов. На основании проведенных исследований установлено, что наибольшую активность имеет композиционное вяжущее с содержанием микрокремнезёма 5% и расходом щелочного активатора 25% (Рис.1).

Таким образом, фактором, в значительной степени определяющим активность ГПВ, является содержание щелочного компонента в составе композиционного вяжущего. При этом, одновременно с ускорением твердения и повышением конечной прочности, существенно сокращаются сроки схватывания ГПВ, что необходимо учитывать при выполнении инъекционных работ в процессе формирования грунтобетонных массивов или ликвидации водопроявлений в подземных сооружениях. В этой связи выполнено исследование влияния замедлителей схватывания добавок на свойства инъекционной смеси. (Рис.3).

В качестве наиболее эффективного замедлителя схватывания использовалась кислота НТФ. При введении замедлителя схватывания формируются комплексные соединения, блокирующие формирование гидросиликатов кальция и гидроалюминатов, образующихся при гидратации ГПВ. Это происходит вследствие электростатического взаимного отталкивания гидратационных продуктов, что также способствует разжижению суспензии.

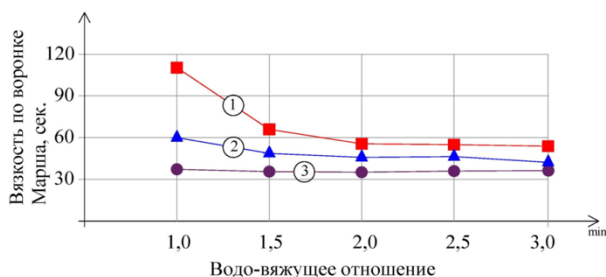


Рис.3: Влияние расхода замедлителя на вязкость инъекционной смеси на основе ГПВ (метакаолин 70%+микрокремнезём 5%+ NaOH 25%; 1, 2, 3 - расход НТФ соответственно 0,05%, 0,2% и 0,8%. Вязкость- 60 мин. после затворения.

При этом следует иметь ввиду, что при дозировке замедлителя схватывания более 0,8% установлено блокирование процесса гидратации в течение длительного периода. Введение щелочного активатора сопровождается значительным повышением величины pH в реакционном растворе, что превышает влияние введенного замедлителя на развитие процесса гидратации (Рис. 4).

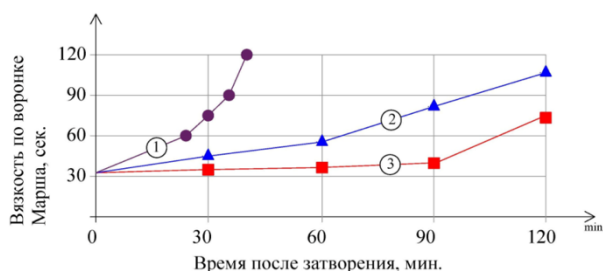


Рис.4: Влияние замедлителя схватывания на вязкость инъекционной смеси на основе ГПВ: состав ГПВ – матакаолин -70%+микрокремнезём-5%+NaOH-25%; В/В=1,5; 1,2,3 – содержание НТФ соответственно 0,05%, 0,2%, 0,8%

Развитию процесса структурообразования ГПВ предшествует растворение алюмосиликатных компонентов в щелочной среде. При этом, растворение стекловидного алюмосиликата сопровождается обменом ионов  $H^+$  на  $Ca^{2+}$  и  $Na^+$ , с последующим гидролизом алюмосиликатных соединений, разрушением деполимеризованной стекловидной структуры и расщеплением соединений Si и Al на мономерные структуры [15-16]. Процесс геополимеризации начинается с растворения тонкодисперсного, термически обработанного алюмосиликатного сырья в щелочной среде. При этом, на степень растворения алюмосиликатного сырья влияют его дисперсность и реакционная способность минеральных компонентов. Растворение алюмосиликатного сырья путем щелочного гидролиза, происходит при достаточном количестве воды и сопровождается разрушением соединений алюминия и кремния, которые переходят в раствор и накапливаются в виде

отдельных частиц на поверхности минеральных компонентов в мономерной форме. По мере накопления твердых частиц в растворе развивается процесс геополимеризации и упрочнения ГПВ [17-18].

Механизм развития процессов структурообразования, при твердении ГПВ, можно условно разделить на 3 этапа:

1-й этап - при введении щелочного активатора происходит расщепление алюмосиликатных минералов с насыщением жидкой фазы ионами алюминия, кремния, кислорода и гидроксильных групп;

2-й этап - образование силановых групп Si-OH и ортосилатов, которые являются первичными зародышами геополимеров;

3-й этап - формирование полимерных систем путем сшивания силановых групп ионами алюминия, кислорода и гидроксильных групп.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований установлено, что щелочная активация метакаолина, в присутствии микрокремнезёма, является более эффективной по сравнению с активацией только на основе щёлочи. Причём, если при применении только щелочного активатора его оптимальное содержание находится в пределах 15% от массы метакаолина, то в присутствии микрокремнезёма его эффективное содержание увеличивается до 25%. Это обусловлено различием в механизме взаимодействия щелочного активатора с алюмосиликатами и микрокремнезёмом, с учётом существенного различия в их растворимости. При дополнительном введении в состав ГПВ микрокремнезёма, активность композиционного вяжущего существенно повышается.

#### Формирование грунтобетонных массивов на основе ГПВ

В природных условиях грунты представляют собой сложную систему твердых, жидких и газообразных компонентов, с возможными органическими включениями. Во всех грунтах, кроме скальных, твердые частицы представляют собой систему минеральных зерен величиной от нескольких миллиметров до пылеватых частиц. Свойства грунтов в значительной степени определяются соотношением в их структуре твердых, жидких и воздушных фаз, а также характером связей между ними. При этом, в зависимости от состояния структурных связей между отдельными элементами, грунты классифицируют как рыхлые, средней плотности, плотные и каркасные. Кроме взаимного расположения, важным параметром свойств грунтов являются виды связей между отдельными частицами грунта, которая может быть водноколлоидной или кристаллизационной. Водноколлоидная связь обусловлена молекулярными силами пленочной воды, а



кристаллизационная – природными химическими соединениями, включая солевые. Песчаные грунты характеризуется наличием мелких зерен с развитой поверхностью и представляют собой дисперсные системы со значительным объемом открытых пор и капилляров. В этих системах дисперсной фазой являются частицы, а дисперсионной средой – вода и воздух, заполняющие поровое пространство грунта. Помимо минеральных частиц, в состав грунтов могут быть включены такие органические вещества, как торф или гумус, которые существенно ухудшают строительные свойства грунтов. На основе ГПВ могут быть получены грунтобетоны с прочностью на сжатие до 25 МПа, обладающие высокой долговечностью, в том числе в условиях илистых и заторфованных грунтов, с повышенной устойчивостью при динамических и вибрационных воздействиях. (Рис.5).

Инъекционные системы на основе ГПВ возможно применять при низких температурах до -40°C без потери прочности от замораживания в условиях мерзлых грунтов. Отличительной особенностью применения ГПВ в геотехническом строительстве является возможность активного участия пылевидных и глинистых частиц грунта в процессе структурообразования и затвердевания при формировании грунтобетонных массивов [19]. Одной из наиболее эффективных областей применения инъекционных смесей на основе ГПС является стабилизация и упрочнение лёссовых грунтов, отличающихся высокой просадочностью при замачивании.

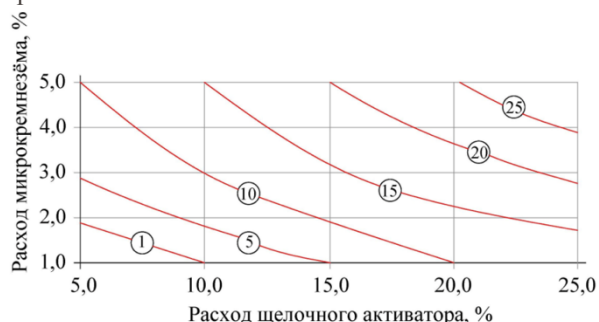


Рис.5. Влияние соотношения компонентов на прочность ГПВ: 1...25 – прочность при сжатии МПа, 28 сут. твердение под водой.

При этом, солевой элемент структуры лёссовых грунтов является дополнительным активатором при затвердевании ГПВ. Грунтобетоны, получаемые на основе ГПВ, обладают низкой проницаемостью и высоким показателем рН поровой жидкости, что обеспечивает их надёжную устойчивость и пригодность для работы в сложных инженерно-геологических и геотехнических условиях. Представление грунтобетона в виде мелкозернистого цементного бетона предоставляет возможность использовать известную нормативную базу и методологию бетонных технологий. При этом необходимо с новых позиций рассмотреть вопросы проектирования, подбора и регулирования состава композиционных вяжущих для упрочнения грунтов в режиме пропитки, прогноза и контроля его

прочности, однородности и долговечности (морозостойкости и коррозионной стойкости) грунтобетона при учёте особенностей и специфики манжетной технологии. Установлено, что свойства грунтобетона, сформированного по манжетной технологии, существенно отличаются от свойств мелкозернистого цементного бетона, приготовленного традиционным способом при равных величинах В/Ц и расходах цемента.

Таблица 1. Влияние В/В на прочность грунтобетона на основе ГПВ

| Модуль крупности песка, Мк | Прочность при сжатии грунтобетона, Мпа, при различном В/В |     |     |     |     |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                            | 1,0                                                       | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| 0,8                        | 12,6                                                      | 9,8 | 7,3 | 5,2 | 3,8 |
| 1,2                        | 9,4                                                       | 6,2 | 5,1 | 3,1 | 1,4 |
| 1,8                        | 5,1                                                       | 3,8 | 3,0 | 2,2 | 0,5 |
| 2,3                        | 2,2                                                       | 1,8 | 1,2 | 0,8 | -   |
| 3,1                        | 0,9                                                       | 0,6 | 0,2 | -   | -   |

**Примечание.** Состав ГПВ: 70% (метаколин) + 25% (гидроксид натрия) + 5% (микрокремнезём). Активность ГПВ - 36 Мпа. Прочность при сжатии в возрасте 28 сут.

Как видно из таблицы 1, основная закономерность изменения прочности грунтобетона от В/В сохраняется для песчаных грунтов после их цементации в режиме пропитки. При этом, влияние В/В как фактора, уменьшается с ростом модуля крупности песка, которая начинает играть наиболее более заметную роль при Мк менее 1,8...1,5.

Следует рассматривать грунт как заполнитель грунтобетона, состоящего из двух частей: части несвязного грунта, аналогично фракциям стандартного песка, и части, состоящей из агрегатов связного грунта. Учитывая более развитую общую поверхность частиц грунта по сравнению со строительным кварцевым песком, а также достаточно компактное их размещение в структуре природного грунта, определяющим конструктивным и технологическим фактором является равномерное распределение инъекционной смеси в природной структуре грунтобетона, с вытеснением воды из капиллярно-пористой структуры и замещением её инъекционной смесью. В этом случае формируется практически бездефектная структура грунтобетонного массива. Кроме того, нагнетание инъекционной смеси в структуру грунта в режиме пропитки сопровождается расклинивающим эффектом между отдельными частицами грунта, обеспечивая их надёжное сцепление и дополнительное уплотнение структуры, что обеспечивает существенное повышение прочностных деформативных характеристик грунтобетона.

## Выводы

В результате выполненных исследований установлены основные закономерности влияния соотношения компонентов на свойства ГПВ и инъекционных смесей на их основе. Установлено, что введение в состав ГПВ микрокремнезёма



сопровождается повышением прочности инъекционных смесей и грунтобетона. Введение в состав инъекционных смесей НТФ в количестве до 08% от массы вяжущего, в качестве замедлителя схватывания, обеспечивает сохранение вязкости инъекционных смесей в период до 90 мин без замедления интенсивности затвердевания. Применение ГПВ в геотехническом строительстве является существенным вкладом в технологию «зеленого строительства», являясь альтернативой применения общестроительных цементов.

#### Библиографический список

1. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. - Киев: «Будивельник», 1978. – 184 с.
2. Krivenko, P. Performance of alkali-activated cements -perspective ways for carbon dioxide emissions reduction / P.Krivenko, E.Kavalerova // Proceed.3rd International Symposium "Non-traditional cement&concrete" (Brno). - 2008. -p. 389-398.
3. Skvara F. Alkali activated materials or geopolymers? *Ceramics - Silikáty*51 (3) 173-177 (2007).
4. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З., Стоянов О.В. Шлакоще-лочные композиционные материалы для защиты от радиоактивных излучений и иммобилизации радиоактивных отходов // Вестник Казанского технологического университета. 2013, №7. с.129-131.
5. Davidovits J. Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology // *Geopolymer* 1999. Saint –Quentin, France. P. 9–40.
6. Davidovits J. Geopolymer chemistry and sustainable Development. The Poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry // proceeding of the world congress Geopolymer 2005. France, Saint–Quentin, 2005. P. 9–15.
7. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications / *Geopolymer Institute*. - 2008. - 592 p.
8. Palomo A., Glasser G. "Chemical-Bonded cementitious materials based on metakaolin", *British Ceramic Transactions and Journal*, 91 [4] 107-112 (1992).
9. Palomo A., Alonso S., Fernández-Jiménez A., Sobrados I., Sanz J. Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products, *J. Am. Ceram. Soc.*, 87 [6] 1141-1145 (2004).
10. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Тымчук Е.И. Структурообразование геополимеров // Молодой ученый. — 2015. — №7. — С. 123-126. — URL <https://moluch.ru/archive/87/17057/> (дата обращения: 20.03.2020).
11. Гусев Б.В., Фаликман В.Р. Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития. Евразийский Союз Ученых. Ежемесячный научный журнал. №2(11). 2015. Часть 2. Стр. 15 – 18.
12. Chatterjee, A.K. Chemistry and engineering of the clinkerization process – incremental advances and lack of breakthroughs, *Cement and Concrete Research*, 41, 2011. pp 624-641
13. Alkali Activated Materials. Ed. by Provis J.L., van Deventer J.S.J. Springer, 2014. 388 p.
14. Weng L., Sagoe-Crentsil K. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis. *J. Mater. Sci.* 2007. V. 42. P. 2997–3006.
15. Khale D., Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development. *J. Mater. Sci.* 2007. V. 42. 729–746.
16. Concrete technology for a sustainable development in the 21st century. Ed. by O.E. Gjorv, K. Sakai. London – New York: E&FNSpon, 2000. 386 p.
17. Barbosa V. F. F., Mackenzie K. J. D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers // *Int. J. Inorg.Mater.* 2000 Vol. 2, Iss. 4, 2. P. 309–317.
18. Duxson P., Provis J. L. Designing precursors for geopolymer cements // *J. Am. Ceram. Soc.* 2008. N. 91 (12). P. 3864–3869.
19. Barbosa V. F. F., Clelio D., Mackenzie K. J. Synthesis and Characterization of Sodium Poly(sialate) Inorganic Polymer Based on Alumina and Silica // *Geopolymer '99: Proceedings of international conference*. Saint-Quentin, France. 1999. P. 65–78.
20. Provis J. L., Duxon P., Van Deventer J. S. J., Lukey G. C. The role of mathematical modeling and gel chemistry in advancing geopolymer technology // *Chem. Eng. Res. Des.* 2005. N.83. P. 853–860.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 23.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.





Научная статья

УДК 69 + 622.331:631

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_140

## ПОЛУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВОГРУНТОВ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЗЕМЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ И УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ<sup>1</sup>

© Авторы 2023

SPIN-код: 6495-0156

**ШАХОВ Сергей Александрович**

доктор технических наук, профессор

*Сибирский государственный университет путей сообщения  
(Россия, Новосибирск)*

SPIN-код: 7161-8528

**ЛЯШЕНКО Татьяна Васильевна**

доктор технических наук, профессор

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
(Украина, Одесса)*

**Аннотация.** Предложен вариант технологической схемы подготовки почвогрунта в полевых условиях, предусматривающий интенсивное перемешивание осадков сточных вод с торфом и песком, термосдвигового воздействия на смесь, транспортирование, выгрузку и временного хранения с целью фиторедиментации, полученного почвогрунта. Применение вновь разработанной технологии позволит получать искусственные почвогрунты, соответствующие санитарным нормам по патогенным микроорганизмам, содержанию солей тяжелых металлов и органических экотоксикантов, а также удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к почвогрунтам урбанизированных территорий.

**Ключевые слова:** искусственный почвогрунт; осадки сточных вод; торф; песок; рекультивация

**Для цитирования:** Получение искусственных почвогрунтов для рекультивации земель промышленных и урбанизированных территорий / С.А. Шахов, Т.В. Ляшенко // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 140-143. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_140

Original article

## OBTAINING ARTIFICIAL SOIL-GROUNDS FOR THE RECULTIVATION OF INDUSTRIAL AND URBAN TERRITORIES

© The Author(s) 2023

**SHANOV Sergey Alexandrovich**

doctor of technical sciences, professor

*Siberian State Transport University  
(Russia, Novosibirsk)*

**LYASHENKO Tatyana Vasilievna**

doctor of technical sciences, professor

*Odessa State Academy of Construction and Architecture  
(Ukraine, Odessa)*

**Abstract.** The article proposes a modified technological approach for preparing soil in natural environments, involving the simultaneous mixing of sewage effluent with peat and sand, thermal shearing of the mixture, transportation, discharge, and temporary storage for the purpose of enhancing the soil's biological properties. The application of the newly developed technology will allow the production of artificial soils that meet sanitary standards and requirements for the soil of urban areas for pathogens, heavy metal salts and organic intoxicants.

**Keywords:** artificial soil; sewage sludge; peat; sand; recultivation

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



**For citation:** Obtaining artificial soil-grounds for the recultivation of industrial and urban territories / S.A. Shahov, T.V. Lyashenko // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 140-143. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_140

### *Введение*

Анализ сведений по свойствам осадков сточных вод (ОСВ) показал, перспективность использования их в качестве почвоулучшающих добавок в антропогенно нарушенных территориях: ОСВ обладает высоким удобряющим эффектом, особенно если при их применении учитываются климатические условия региона, типы почв, виды осадка и конкретно вид выращиваемой культуры [1-3]. В результате применения осадков сточных вод не только повышается урожайность сельскохозяйственных культур, но и улучшаются агрохимические свойства почвы: увеличивается содержание азота и фосфора, повышается интенсивность поглощения и уменьшается кислотность. Удобряющий эффект осадков сточных вод, главным образом определяется наличием в них азота. Использование общего азота, содержащего в том или ином виде ОСВ, в первый год зависит, главным образом, от минерального азота, который доступен растениям сразу же, органическая же часть за счет минерализации освобождается медленно, в первый год порядка 15-17%). В ОСВ, сброшенных в термофильных условиях, азот усваивается в первый год примерно на 46,6%. Это объясняется высоким содержанием аммиачного азота.

Наряду с источником азота ОСВ могут играть важную роль в пополнении запасов фосфора в почве. Высокое его содержание в ОСВ связано с усиленным применением фосфорсодержащих моющих средств в быту, а также тем, что фосфор и его соединения обладают меньшей подвижностью и растворимостью в отличие от калия, который легко вымывается и уносится с очищенными стоками.

Многочисленные результаты исследований свидетельствуют о положительном влиянии осадков сточных вод на урожайность многих сельскохозяйственных культур [4-5]. Однако, при положительном эффекте от использования ОСВ в качестве удобрения, необходимо учитывать, что при использовании органоминеральных удобрений на основе осадков городских сточных вод в почве могут накапливаться токсические элементы – тяжелые металлы: химические элементы, имеющие плотность более 5 г/см<sup>3</sup>. Тяжелые металлы поливалентны, хорошо сорбируются почвами, образуют плохо растворимые соединения с фосфатами и гидроокисями, что способствует их постепенному накоплению в почвах [6]. Такое положение требует постоянного контроля состояния почв, так как несущественные на первый взгляд количественные изменения, происходящие в результате поступления металлов, могут в определенный момент привести к новому качеству.

Тяжелые металлы находятся в почве в различной форме. Они могут включаться в твердую

фазу почвы, находиться в виде свободных ионов в почвенных растворах, в виде растворимых органоминеральных комплексов или адсорбированными на коллоидных частицах. Накопление содержащихся в осадке тяжелых металлов и полимерного флокулянта повышает токсический потенциал почвы. Наибольшее опасение вызывает существенное изменение почвы как среды, благоприятной для обитания полезной микрофлоры, а также фауны, включающей и дождевых червей [7].

В настоящее время МУП Горводоканал г. Новосибирска проведены сертификационные испытания ОСВ, хранящихся последние 10-15 лет на иловых площадках. Результаты испытаний показали, что большая часть **осадков** по агрохимическим показателям и даже содержанию отдельных тяжелых металлов соответствуют требованиям указанных выше нормативных документов. Однако, поскольку в применяемых технологических схемах обработки осадков на большинстве объектов г. Новосибирска отсутствуют сооружения для их обеззараживания, то многие пробы ОСВ по санитарным показателям не соответствуют нормативным требованиям. Поэтому создание комплексной научно обоснованной технологии обезвреживания осадков, которая позволяет решить проблемы - утилизации их в сельском хозяйстве, строительстве и ЖКХ, сократить площадь иловых карт, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, остается одной из актуальных задач.

*Целью работы* является разработка технологической схемы подготовки почво-грунтов для последующей использования их при рекультивации урбанизированных территорий.

### *Материалы и методы*

Используемое для приготовления почво-грунта сырье:

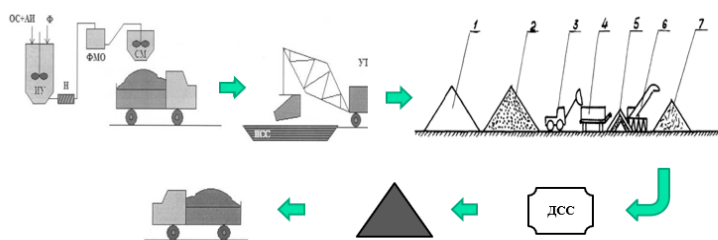
- осадки сточных вод с карт депонирования городской станции очистки сточных вод г. Новосибирска.
- торф низинных и переходных типов месторождений Новосибирской области, со средней и высокой зольностью, средне- и малоразложившиеся;
- осадок с песколовков.

### *Результаты и их обсуждение*

Искусственные почвенные грунты представляют собой готовые к применению сыпучие питательные смеси с запахом растительной земли, обогащенные всеми необходимыми элементами питания растений. Для возможности получения и использования при рекультивации большого объема техногенно загрязненных почво-грунтов разработан вариант технологической схемы подготовки почво-

грунта в полевых условиях (рис.), предусматривающий интенсивное перемешивание осадков с торфом и песком, термодвигового воздействие на смесь (для интенсификации процессов детоксикации и рекультивации), транспортирование, выгрузку и временного хранения с целью фиторедиментации, полученного почво-грунта.

Рисунок. Технологическая схема приготовления почво-грунта в полевых условиях.



**ОС+АИ** - смесь осадка и избыточного активного ила; **Ф** - флокулянты;

**ИУ** - илоуплотнитель; **Н** - насос; **ФМО** - фильтр-механическое обезвреживание; **СМ** - смеситель обезвоженных осадков; **псс** - площадки складирования обезвоженных осадков; **ДСС** - дозирующая-смесительная станция. 1, 2- штабеля исходных компонентов, 3 – погрузчик, 4 – передвижной дозатор, 5 – формирующий штабель; 6 – шнекороторный перегружатель; 7 – штабель окончательной доводки.

Технологическая процесс получения почво-грунта включает следующие операции. На площадку с твердым покрытием доставляются компоненты смеси (осадок, торф, песок). Погрузчик по очереди загружает компоненты в дозатор, формирующий штабель, в котором компоненты располагаются послойно. После окончания укладки шнекороторный перегружатель, проходя вдоль штабеля, перемешивает компоненты и перебрасывает смесь в штабель окончательной подготовки. Приготовленная смесь компостируется в штабеле в течение пяти-шести месяцев. Последняя операция учитывая отечественный и зарубежный опыт по складированию осадков включена для:

- более глубокого обезвреживания осадка, меняющее его тиксотропные и пластичные свойства с улучшением механических и прочностных свойств, а также снижающего количество дренажных вод, и позволяющего при складировании осадков использовать тяжелую технику;
- более глубокой стабилизации (минерализации) осадка с целью предотвращения развития анаэробных микробиологических процессов разложения органического вещества с выделением биогаза (состоящего из метана, двуокиси углерода и др.).

После окончания детоксикации с помощью дозирующей-смесительной станции проводят перемешивание и измельчение смеси до размеров частиц не более 2,5 мм. При этом смесь дополнительно усредняется и обогащается кислородом воздуха. После чего оформляется новый штабель, из которого почво-грунт навалом отгружается потребителю.

Применение вновь разработанной технологии позволит получать искусственные почво-грунты, соответствующие санитарным нормам по патогенным микроорганизмам, содержанию солей тяжелых металлов и органических экотоксикантов, а также удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к почво-грунтам урбанизированных территорий.

Почво-грунты, полученные по вновь разработанной технологии, могут успешно применяться:

- для благоустройства городских территорий;
- в инженерной подготовке (рекультивации) полигонов хранения отходов КОС как грунт «обратной засыпки»;
- в ландшафтно-планировочных работах для восполнения дефицита грунтов (подсыпка территории, засыпка оврагов);
- в качестве укрывного материала на полигонах твердых бытовых отходов (ТБО), золоотвалах ТЭЦ и территориях свалок строительного мусора.

## Заключение

Для проведения детоксикации и рекультивации большого объема техногенно загрязненных почво-грунтов предложена технологическая схема подготовки осадков для рекультивации нарушенных земель, предусматривающая интенсивное перемешивание осадков с торфом и песком, термодвигового воздействие на смесь (для интенсификации процессов детоксикации и рекультивации), транспортирование, выгрузку и временного хранения с целью фиторедиментации, полученного почво-грунта. Использование вновь полученных почво-грунтов позволит проводить рекультивацию техногенно-деградированных земель без использования естественных плодородных почв; обеспечит увеличение приживаемости и сохранности зеленых насаждений урбанизированных территорий, промышленных и санитарно-защитных зон, обеспечит перевод отдельных видов городских отходов из категории загрязнителей окружающей среды в нетоксичный или даже плодородный почво-грунт.

## Библиографический список

1. Михайлов, Л.Н. Научные основы применения осадков городских сточных вод в качестве удобрения / Л.Н. Михайлов Л.Н., И.В. Пужайкин, М.П. Марковская, Г.К. Марковская - Самара: Кн. изд-во, 1998. 160 с.
2. Шахов, С. А. Состав и технологические свойства осадков водоотведения и зол,



- образующихся при их сжигании / С. А. Шахов, Н. С. Ключникова, А. С. Кожемяченко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 11(671). – С. 103-113. – EDN TKPFFF.
3. Шуравилин, А. В. Опыт удобрения почв осадком сточных вод в Московской области / А. В. Шуравилин, Н. В. Сурикова // Агрохимический вестник. – 2006. – № 1. – С. 24-27. – EDN LLVAER.
4. Результаты утилизации осадков сточных вод во Владимирской области / Т. Н. Большева, А. Р. Валитова, П. П. Кижаккин, В. А. Касатиков // Агрохимический вестник. – 2006. – № 1. – С. 28-29. – EDN LLVAFB.
5. Куликова, А. Х. Применение осадков сточных вод в качестве удобрения в сельском хозяйстве Ульяновской области / А. Х. Куликова, Н. Г. Захаров, Т. В. Починова // Агрохимический вестник. – 2010. – № 5. – С. 32-35. – EDN MVSPFN.
6. Ильин, В.Б. Тяжелые металлы в системе «почва – растение». / В.Б. Ильин // Новосибирск: Наука. Сиб. отд. 1991. 320 с.
7. Касатиков, В.А. Критерии загрязненности почвы и растений микроэлементами, тяжелыми металлами при использовании в качестве удобрения осадков городских сточных вод /В.А. Касатиков // Агрохимия. – 1991. – № 11. С. 78 – 83.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 01.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья

УДК 691.3

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_144

## ОПЫТ ОМСКОГО РЕГИОНА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ ТЭЦ<sup>1</sup>

© Авторы, 2023  
SPIN: 4276-7420

**ЯВИНСКИЙ Александр Викторович**

аспирант

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Россия, Омск, e-mail: 121qqz@mail.ru)*

SPIN: 6949-2994

**ЧУЛКОВА Ирина Львовна**

доктор технических наук, профессор

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Россия, Омск, e-mail: le5@inbox.ru)*

SPIN: 2873-6860

ORCID 0000-0002-2378-3947

ScopusID: 55887733300

ResearcherID: A-4757-2016

**ЛЕСОВИК Валерий Станиславович**

член-корреспондент РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Россия, Белгород)*

**Аннотация.** Приведены данные об отходах тепловых электростанций в России и Омской области. Выявлены экологические угрозы и риски связанные с хранением золы гидроудаления на золоотвале. Определен химический состав золы гидроудаления. Предложены составы тяжелого бетона с заменой части цемента золой гидроудаления, которые могут быть использованы при производстве дорожных плит. Исследованы прочность, водопоглощение и морозостойкость составов тяжелого бетона с золой гидроудаления и проведено сравнение с контрольным составом.

**Ключевые слова:** зола гидроудаления; цемент; бетон; прочность бетона; морозостойкость; экология; строительные материалы

**Для цитирования:** Явинский А.В., Чулкова И.Л., Лесовик В.С. Опыт Омского региона по переработке отходов ТЭЦ // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 144-147. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_144

<sup>1</sup> Работа представлялась в виде устного доклада на Международной научно-практической конференции «Новые прогрессивные рецептурно-технологические решения в строительном материаловедении» (18-21 июля 2023 г., Новосибирск).



Original article

## THE EXPERIENCE OF THE OMSK REGION ON THE RECYCLING OF WASTES FROM THERMAL POWER PLANTS

© The Author(s) 2023

**YAVINSKY Alexander Viktorovich**

PhD Candidate

*Siberian State Automobile and Highway University  
(Russia, Omsk, e-mail: 121qqz@mail.ru)*

**CHULKOVA Irina Lvovna**

doctor of technical sciences, professor

*Siberian State Automobile and Highway University  
(Russia, Omsk, e-mail: le5@inbox.ru)*

**LESOVIK Valery Stanislavovich**

Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof.  
*Belgorod State Technological University named after. V.G.  
Shukhova (Russia, Belgorod)*

**Abstract.** The article presents data on waste from thermal power plants in Russia and the Omsk region. The ecological threats and risks associated with the storage of the ash or hydro-removal of the ash have been identified. The chemical composition of the ash of hydro-removal has been determined. Compositions of heavy concrete with the replacement of a part of cement with hydro-removal ash, which can be used in the manufacture of road plates, are proposed. The strength, water absorption and frost resistance of compositions of heavy concrete with wet ash discharge have been investigated and comparison with the control composition has been conducted.

**Keywords:** wet ash discharge; cement; concrete; concrete strength; frost resistance; ecology; building materials

**For citation:** The experience of the Omsk region on the recycling of wastes from thermal power plants / A.V. Yavinsky, I.L. Chulkova, V.S. Lesovik // Expert: Theory and Practice. 2023. No. 4 (23). Pp. 144-147. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_144

Образующиеся при сжигании угля отходы тепловых электростанций (ТЭЦ) создают серьезную проблему при их утилизации и хранении [1-2]. В мире наблюдается тенденция к повышению количества потребляемого твердого топлива на тепловых электростанциях [3]. За последние 30 лет в 2 раза выросло количество потребляемого угольного топлива. Вследствие сжигания угля на ТЭЦ вырабатываются зола и шлак, которые удаляются сухим или мокрым способом. Ежегодная выработка отходов ТЭЦ в России составляет более 25 млн. тонн, однако, переработке подвергается не более 10% вырабатываемых в год отходов, что значительно меньше, чем в других развитых странах (рис. 1). Следствием чего стали огромные площади золоотвалов по всей России. Общая площадь золоотвалов в России составляет более 30 тыс. га, на которых хранится около 1,5 млрд тонн отходов [4-5].

Поскольку зола гидроудаления является производственным отходом, то основные затраты, связанные с ее использованием в промышленной отрасли, составляет транспортировка и подготовительные операции (помол и/или сушка). Использование золы гидроудаления в состоянии

естественной влажности может позволить уменьшить затраты предприятия на производство изделий, в которых она будет применяться.

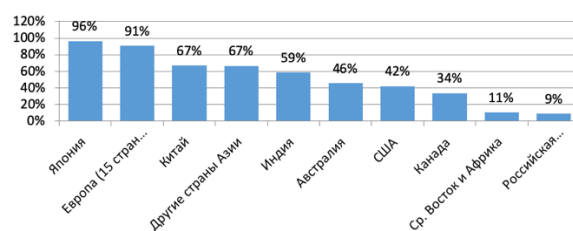


Рисунок 1 - Сравнительный анализ по мировым объемам утилизации вторичных ресурсов

В данной статье приведены результаты испытаний составов тяжелого бетона с заменой компонентов золой гидроудаления в состоянии естественной влажности и контрольного беззолного состава, которые соответствуют требованиям ГОСТ и могут использоваться при производстве дорожных плит.

В работе использовалась зола гидроудаления с ТЭЦ-5 города Омска. Химический состав был



определен посредством рентгенофлуоресцентного метода и представлен в таблице 1.

По химическому составу зола гидроудаления является ультракислой и не обладает собственной активностью. Зола гидроудаления применялась в состоянии естественной влажности, что учитывалось при расчете необходимого количества воды в составе тяжелого бетона. Влажность определялась высушиванием до постоянной массы и составила 39%.

Удельная поверхность золы гидроудаления определялась с помощью прибора ПСХ-12 и составила в 210-240 м<sup>2</sup>/кг.

Для изготовления бетонных образцов использовался омский цемент ЦЕМ I 42,5Н, который был исследован в лаборатории. Установлено, что цемент соответствует всем требованиям ГОСТ 31108-2020.

В данной работе из тяжелого бетона готовились образцы кубы с ребром 10 см, которые подвергались ТВО по режиму 2 ч подъем температуры, затем изотермический прогрев при температуре +60 °С в течении 7 часов, после чего образцы плавно остывали в течении 3 часов. Составы тяжелого бетона класса В25, рассчитанные на 1 м<sup>3</sup> представлены в таблице 2. Применение пластифицирующей добавки должно позволить компенсировать повышенную водопотребность составов с золой гидроудаления, поэтому все составы обладают одинаковым В/Ц (водоцементное отношение), зола учитывалась как часть вяжущего.

В составах №2 и №3 заменялась 20% и 30% цемента по сравнению с контрольным беззолным составом №1 соответственно. Образцы испытывались после ТВО, а также часть образцов были испытаны на более поздних сроках твердения

(в возрасте 45 и 90 суток) и показали следующие результаты (таблица 3).

Исходя из представленных результатов можно сделать вывод, что замена части цемента золой гидроудаления позволяет получать составы тяжелого бетона, соответствующие требованиям ГОСТ 33148-2014 для производства дорожных плит.

По результатам испытаний можно заметить, что прочность беззолного состава непосредственно после ТВО выше, чем у составов №2 и №3 на 7% и 12% соответственно. Снижение прочности у составов с золой может быть следствием неполной гидратации цемента, так как зола гидроудаления обладая пористой структурой забирает часть воды в микропоры и даже добавление пластификатора не позволяет полностью компенсировать данный негативный эффект. Однако, образцы с золой гидроудаления набирают прочность на более поздних сроках твердения интенсивнее, чем контрольный образец. Это проявляется в повышении прочности состава №2 в возрасте 45 суток на 18%, когда у беззолного состава данный прирост составил всего 13%. В возрасте 90 суток прочность состава №2 выше, чем у контрольного беззолного состава №1 на 5%, а состав №3 показывает прочность при сжатии не уступающую составу №1. Из чего можно сделать вывод, что составы тяжелого бетона с золой гидроудаления обладая прочностью ниже, чем контрольный беззолный состав на ранних сроках твердения способны активнее набирать прочность в более долгий период времени, что положительно скажется на итоговой прочности таких составов, за счет взаимодействия воды, которая высвобождается из пор золы гидроудаления.

Таблица 1 – Химический состав омской золы гидроудаления

| SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | ППП* |
|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|
| 61,93            | 0,75             | 25,0                           | 2,65                           | 0,13 | 0,34 | 3,01 | 1,0               | 0,52             | 0,42                          | 4,67 |

\*ППП – потери при прокаливании

Таблица 2 – Составы тяжелого бетона

| № Составы | Цемент, кг | Влажная зола гидроудаления*, кг | Песок, кг | Щебень, кг | Вода, кг | Добавка Sika, кг |
|-----------|------------|---------------------------------|-----------|------------|----------|------------------|
| 1         | 336        | -                               | 521       | 1470       | 148      | -                |
| 2         | 269        | 110                             | 521       | 1470       | 105      | 2,35             |
| 3         | 235        | 165                             | 521       | 1470       | 83       | 2,35             |

\* масса влажной золы гидроудаления учитывает количество воды

Таблица 3 – Результаты испытаний образцов тяжелого бетона

| Вид испытания                                          | № Составы |      |      | Требования ГОСТ 33148-2014 |
|--------------------------------------------------------|-----------|------|------|----------------------------|
|                                                        | 1         | 2    | 3    |                            |
| Прочность при сжатии (после ТВО) R <sub>сж</sub> , МПа | 35,6      | 33,3 | 31,6 | >28,8                      |
| Прочность при сжатии R <sub>45</sub> , МПа             | 40,8      | 40,2 | 38,2 | -                          |
| Прочность при сжатии R <sub>90</sub> , МПа             | 46,1      | 48,5 | 46,0 | -                          |
| Водопоглощение максимальное, W <sub>max</sub> , %      | 3,0       | 4,1  | 4,5  | >5%                        |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>                           | 2305      | 2261 | 2234 | -                          |
| Морозостойкость, циклы                                 | 200       | 200  | 200  | 200                        |





Повышение водопоглощения и снижение плотности у составов №2 и №3 может быть следствием разрыхления структуры образцов при использовании золы гидроудаления. Данный эффект можно компенсировать использованием гидрофобных добавок, что будет изучаться в дальнейших работах.

Все составы успешно прошли 200 циклов испытания по ускоренной методике определения морозостойкости, что соответствует марке по морозостойкости F200. Высокая марка по морозостойкости позволяет использовать предложенные составы в климатических условиях Западной Сибири, которые характеризуются частой сменой погодных условий и перепадами температур.

С учетом возросшей стоимости на строительные материалы, в частности на портландцемент, использование разработанных составов позволяет снизить стоимость 1 м<sup>3</sup> тяжелого бетона на 540 рублей и 806 рублей для состава №2 и №3 соответственно.

#### *Заключение*

В ходе выполнения работы был определен химический состав золы гидроудаления омской ТЭЦ-5. Установлено, что омская зола гидроудаления является ультракислой и не обладает собственной активностью.

Были запроектированы составы тяжелого бетона с заменой 20% и 30% цемента золой гидроудаления и контрольный состав. Установлено, что введение золы гидроудаления в состав тяжелого бетона снижает раннюю прочность при сжатии, однако, со временем данный негативный эффект компенсируется за счёт взаимодействия непрореагировавших частиц цемента с высвобождающейся из пор золы гидроудаления водой. В возрасте 90 суток состав с заменой 20% цемента золой гидроудаления показывает прочность при сжатии выше, чем контрольный беззолый образец.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 23.08.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 23.08.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.

Установлено, что замена 20% и 30% цемента золой гидроудаления и введение пластификатора позволяет получать составы тяжелого бетона с маркой по морозостойкости F200.

#### **Библиографический список**

1. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля / Ю. М. Баженов, В. В. Воронин, Л. А. Алимов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 12(111). – С. 1385-1391. – DOI 10.22227/1997-0935.2017.12.1385-1391. – EDN YMEBXK.
2. Лесовик, В. С. Теоретические предпосылки создания цементных композитов повышенной непроницаемости / В. С. Лесовик, Р. С. Федюк // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2016. – № 1(47). – С. 65-72. – EDN VNVNKB.
3. Lemly A. D. Damage cost of the Dan River coal ash spill // Environmental Pollution. – 2015. – Т. 197. – С. 55-61.
4. Нигматулин, Р. И. Как обустроить экономику и власть России: анализ инженера и математика / Р. И. Нигматулин // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2007. – № 5. – С. 3-12. – EDN KFAABN.
5. Явинский, А. В. Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия / А. В. Явинский, И. Л. Чулкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 3. – С. 16-24. – DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-3-16-24. – EDN AEHVCK.



Научная статья

УДК 69 + 69.003

ГРНТИ: 67.01 Общие вопросы строительства; 06.71.05: Экономика строительства

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_148

## РАЗВИТИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА КАДРОВ

© Авторы 2023

SPIN: 9373-0609

AuthorID: 655165

ORCID: 0000-0002-1966-1250

**ЕРМОЛИНА Лилия Валерьевна**

кандидат экономических наук, доцент, кафедра

«Прикладной менеджмент»

*Самарский государственный экономический университет*

*(Россия, Самара, e-mail: ermolina@mail.ru)*

SPIN: 9496-4605

AuthorID: 736247

**ПРОНИНА Наталья Николаевна**

кандидат экономических наук, доцент, преподаватель

*Колледж Самарского государственного технического*

*университета (Россия, Самара, pronina\_natalya@mail.ru)*

SPIN: 9496-4605

AuthorID: 736247

ORCID: 0000-0003-2556-0824

**МЕЛЬНИКОВА Дарья Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры

"Автоматизация и управление технологическими

процессами", заместитель директора Института автоматики

и информационных технологий

*Самарский государственный технический университет*

*(Россия, Самара, e-mail: melnikovada1988@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье рассмотрено развитие строительной отрасли России в текущих условиях. Произведён выборочный анализ динамики объемов и стоимости строительных работ за период 2016-2022 годов и первых восьми месяцев 2023 года, показан темп их роста на основе открытых официальных статистических данных Росстата.

Обозначены факторы, ограничивающие динамику развития строительного сектора: высокая стоимость стройматериалов и нестабильность их производства; высокие налоговые платежи; прогнозирование значительного роста ключевой ставки ЦБ РФ.

Дефицит кадров в строительном секторе экономики назван решающим сдерживающим фактором для его развития.

**Ключевые слова:** строительная отрасль; дефицит строительных кадров; рынок труда в строительстве; макроэкономическое состояние; экономика строительства

**Для цитирования:** Ермолина Л.В., Пронина Н.Н., Мельникова Д.А. Развитие строительной отрасли России в условиях дефицита кадров // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 148-153. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_148



Original article

## DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN CONSTRUCTION INDUSTRY UNDER CONDITIONS OF SHORTAGE OF PERSONNEL

© The Author(s) 2023

**ERMOLINA Liliya Valerievna**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department  
of Applied Management  
Samara State Economic University  
(Russia, Samara, e-mail: [ermolina@mail.ru](mailto:ermolina@mail.ru))

**PRONINA Natalya Nikolaevna**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Lecturer  
College of Samara State Technical University  
(Russia, Samara, [pronina\\_natalya@mail.ru](mailto:pronina_natalya@mail.ru))

**MELNIKOVA Daria Alexandrovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the  
Department "Automation and Control of Technological  
Processes", Deputy Director of the Institute of Automation and  
Information Technologies  
Samara State Technical University  
(Russia, Samara, e-mail: [melnikovada1988@mail.ru](mailto:melnikovada1988@mail.ru))

**Abstract.** The article considers the development of the construction industry in Russia under current conditions. A meticulous examination of the cyclical evolution of the volume and cost of construction works for the period 2016–2022, and the initial eight months of 2023 was conducted. The growth rate of these variables was determined based on the open official statistics of Rosstat. The factors that impede the development of the construction industry have been identified, including the high cost of building materials and the instability of their production, high tax payments, and the forecast of a significant increase in the key rate of the Central Bank of the Russian Federation. The dearth of skilled personnel in the construction sector of the economy has been identified as a significant obstacle to its growth.

**Keywords:** construction industry; shortage of construction personnel; labor market in construction; macroeconomic state; construction economy

**For citation:** Ermolina L.V., Pronina N.N., Melnikova D.A. Development of the Russian construction industry under conditions of shortage of personnel // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 148-153. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_148

### *Актуальность*

Строительная отрасль, традиционно являясь одним из локомотивов российской экономики [см. подробнее 1-5], способствует достижению значительных позитивных результатов в народном хозяйстве, в то же время она ориентирована на системное выявление «оптимальных научно-технических, технологических и организационных решений, обладающих мультипликативным эффектом для всей экономики» [1]. По мнению экспертов [5] наибольший мультипликативный эффект в экономике государства, в первую очередь, в экономической составляющей муниципальных образований и регионов, дает жилищное строительство.

При этом исследователи [1-7] отмечают необходимость качественных изменений в отрасли, которые смогут помочь в решении задач по стабильному росту объемов строительства жилья,

безусловному выполнению инфраструктурных проектов в условиях перманентного напряжённого положения в экономике страны, сформированного санкционным давлением недружественных стран.

### *Методика*

Базовые макроэкономические показатели строительного сектора экономики России, формирующие понимание общей социально-экономической ситуации в стране, рассмотрены в данной работе на основе комплекса методов: диалектика, анализ и синтез, статистическая сводка и группировка базовых показателей отрасли, их исторический, системный и причинно-следственный анализ. С нашей точки зрения, именно такой комплексный подход даёт возможность составить достоверную картину по настоящему положению российской строительной отрасли.



### Результаты исследования и их обсуждение

Проблематикой строительной отрасли России занимаются значительная часть отечественных авторов, посвящая свои публикации рассмотрению определенных вопросов и/или направлений её развития.

Тиньгаев А.В. [2] анализирует системные проблемы в текущем состоянии отечественной строительной отрасли, вызванные санкционным давлением, и определяет перспективные направления для дальнейшего поступательного движения.

В работе Москвичева М.А. [1] изучил состояние отрасли с точки зрения оценки базовых показателей деятельности строительных организаций, в том числе уровень их обеспеченности заказами и финансированием. Так же показана зависимость российского производства стройматериалов от поставок импортного сырья и, особенно, оборудования из недружественных экономик. Автор обосновывает ряд мероприятий по повышению уровня конкурентоспособности отечественного производства строительных материалов.

В.В. Полити [6], призывая отказаться от политики «навешивания ярлыков на строительную отрасль (неповоротливость, инерционность и традиционализм), констатирует отсутствие целостного интегрированного подхода к решению стратегических национальных задач по всей вертикали управленческой иерархии, что мешает поступательному развитию экономики и, в частности, строительной отрасли. Предлагается авторский вариант взаимодействия национальных проектов, обеспечивающий кооперацию и координацию национальных проектов, федеральных и региональных государственных программ, которые и будут опорными точками предприятий, обеспечивающих экономический рост и инновационное развитие.

Академик РААСН Ерофеев В.Т. с коллегами [8], проведя аналитический обзор различных типов цифровизации современного строительства, считают цифровизацию эффективным инструментом современного развития строительной отрасли.

М.С. Агафонова и М.А. Мещерякова показывают функционирование строительных предприятий в условиях неопределенности с целью решения «триады важнейших задач: переход к Индустрии 5.0, борьба с эпидемией коронавируса и противодействие санкциям и шантажу со стороны США и ряда других стран» [9].

Далее предлагаем рассмотреть и обсудить ряд базовых статистических данных (в динамике) строительной отрасли России (см. рис. 1-3 и табл. 1).

В канун Дня строителя Президент Путин провел традиционное совещание по развитию строительной отрасли, где отметил, что отрасль – крупный мультипликатор для всей экономики, демонстрирующая хорошие показатели [см. 13]. "Меры поддержки и развития жилищного строительства, принятые правительством РФ за последние годы, позволили поддержать отрасль в период санкционного давления и увеличивать

портфель реализуемых проектов строительства жилья", – отметил министр строительства и ЖКХ РФ Ирек Файзуллин на том же совещании [13].



Рисунок 1. Объем строительных работ в РФ с 2016 по 2022 год (по годам в млрд. руб.) [10]



Рисунок 2. Динамика роста стоимости строительных работ в РФ с 2015 по 2022 год (по годам в %) [11]

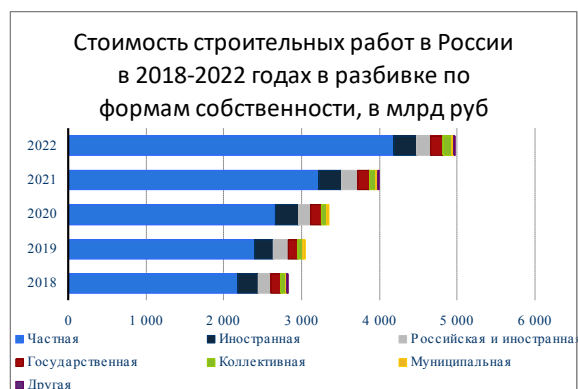


Рисунок 3. Стоимость строительных работ в РФ с 2018 по 2022 год (по формам собственности в млрд. руб.) [12]

По данным Росстата [14], в июне 2023 года объем работ, выполненных по виду деятельности «Строительство», составил 1281,1 млрд. рублей, что на 10% больше в сравнении с аналогичным показателем июня 2022 года (в сопоставимых ценах), а по итогам 1-го полугодия 2023 года объем строительных работ по сравнению с прошлым годом вырос на 9,2%, достигнув в абсолютных цифрах 5,62 трлн. руб.

В целом в 2023 году деловой климат в строительстве остаётся стабильным, на это влияют ключевые факторы – физический объем работ и обеспеченность заказами [см. 14]. Здесь, несомненно, государство сумело поддержать отрасль в период



санкционного давления со стороны недружественных экономик.

Среди факторов, ограничивающих динамику, как и прежде, специалистами отмечаются: высокая стоимость стройматериалов и нестабильность их производства (см. табл. 2), высокие ставки налогообложения и ожидание резкого роста ключевой ставки ЦБ РФ в IV квартале 2023 года.

С нашей точки зрения, для строительной отрасли наиболее ощутим фактор недостатка трудовых ресурсов. Российская стройиндустрия, как и в период пандемии, столкнулась с нехваткой рабочих рук. Объективный анализ показывает: проблема дефицита работников в строительстве стала образовываться в России более 10 лет назад [см., например, 15]. Ранее она решалась достаточно прозаично – притоком мигрантов из стран ближнего зарубежья. Вместе с тем, рост объемов строительства за последние 3 года, в том числе за счет масштабного строительства на новых территориях наряду с резким ослаблением курса рубля (что автоматически делает

непривлекательным российский рынок труда для граждан из стран СНГ) оказали решающее влияние на ситуацию по возникновению дефицита кадров в строительной отрасли.

Несомненно, отток специалистов на нужды СВО (по различным данным от 4 до 7 процентов от общего числа занятых в отрасли) так же внес свой негативный вклад в рынок труда.

На текущий момент в российском строительном секторе декларируется дефицит персонала от 10 до 25 процентов. При любом раскладе – это существенный фактор риска для строительной отрасли в среднесрочной перспективе, учитывая, что число занятых в ней в 2022 году (данные Росстата) составило 11,1 млн. человек (15% от всех работающих в РФ), который ведёт к явному увеличению издержек строительных компаний и, соответственно, к автоматическому росту цен на конечный продукт строительной отрасли.

Таблица 1. Стоимость строительных работ в РФ с 2018 по 2022 год  
(по формам собственности в млрд. руб.) [12]

|      | Частная | Иностранная | Российская и иностранная | Государственная | Коллективная | Муниципальная | Другая |
|------|---------|-------------|--------------------------|-----------------|--------------|---------------|--------|
| 2018 | 2176,7  | 252,2       | 173,5                    | 125,2           | 63,4         | 17,7          | 6,8    |
| 2019 | 2398,5  | 228         | 187,9                    | 130,2           | 75,9         | 19,6          | 6,1    |
| 2020 | 2651,7  | 303,7       | 155,8                    | 138,7           | 69,5         | 21,7          | 8,5    |
| 2021 | 3219    | 291,7       | 208,2                    | 148,2           | 88,1         | 23,2          | 14,9   |
| 2022 | 4179,5  | 293,9       | 177,71                   | 166,8           | 112,6        | 25,6          | 10,1   |

Таблица 2. Выпуск основных видов стройматериалов, изделий и конструкций за январь-август 2023 года  
(выборочно)<sup>1</sup>

|    | Наименование                                                                                           | 01-08. 2023 | % к 2022     |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|
| 1  | Бетон готовый к заливке (товарный бетон), млн. куб. м                                                  | 43,2        | 113,1        |
| 2  | Плиты древесностружечные, тыс. усл. куб. м                                                             | 7532        | 108,9        |
| 3  | Стекло листовое литое, прокатное, тянутое или выдувное, но не обработанное другим способом, млн. кв. м | 23,8        | 108,9        |
| 4  | Обои, млн. усл. кусков                                                                                 | 111         | 106,8        |
| 5  | Двери и их коробки деревянные, млн. кв. м                                                              | 14,6        | 103,2        |
| 6  | <b>Портландцемент, цемент глиноземистый, цемент шлаковый и аналогичные цементы, млн. т</b>             | <b>42,6</b> | <b>102,1</b> |
| 7  | Блоки и прочие изделия сборные строительные, млн. куб. м                                               | 18,8        | 101,1        |
| 8  | Пески природные, млн. куб. м                                                                           | 212         | 96,7         |
| 9  | Кирпич керамический неогнеупорный строительный, млн. усл. кирпичей                                     | 3,5         | 94,0         |
| 10 | Блоки стеновые силикатные, млрд. усл. кирпичей                                                         | 3,2         | 93,4         |
| 11 | Фанера, тыс. куб. м                                                                                    | 2155        | 91,1         |
| 12 | Кирпич строительный (включая камни) из цемента, бетона или искусственного камня, млрд. усл. кирпичей   | 1,5         | 89,7         |
| 13 | Окна и их коробки деревянные, тыс. кв. м                                                               | 211         | 76,1         |
| 14 | Плитки керамические глазурованные для внутренней облицовки стен, млн. кв. м                            | 35,7        | 73,2         |

<sup>1</sup> Составлена авторами по открытым данным Росстата [14].



### Выводы

По итогам первых восьми месяцев 2023 года можно уверенно констатировать: в условиях санкционного давления и геополитических ограничений российская строительная отрасль, при непосредственной поддержке государства, выработала систему экономических изменений и смогла сгладить болезненные последствия ограничений в банковском секторе, комплексном нарушении логистики поставок импорта материалов и оборудования.

При этом в строительном секторе России сохраняется негативное влияние факторов, ограничивающих его динамику развития: высокая стоимость стройматериалов и нестабильность их производства, опасения резкого роста ключевой ставки ЦБ РФ в конце текущего года.

В текущих условиях главным сдерживающим фактором для развития отрасли определен дефицит кадров.

### Библиографический список

1. Москвичев, М. А. Анализ современного состояния строительной отрасли в Российской Федерации / М. А. Москвичев // Экономическое развитие России. – 2023. – Т. 30, № 6. – С. 14-22. – EDN WSMEXK.
2. Тиньгаев, А. В. Строительная отрасль России в условиях санкций: проблемы и новые возможности / А. В. Тиньгаев // Глобальный научный потенциал. – 2023. – № 3(144). – С. 239-243. – EDN OHLERR.
3. Сапунова, Т. А. Анализ развития строительного бизнеса в России / Т. А. Сапунова // Вестник Академии знаний. – 2022. – № 48(1). – С. 277-281. – DOI 10.24412/2304-6139-2022-48-1-282-286. – EDN JVZAUH.
4. Кустов, В. С. Развитие строительной отрасли в современных отечественных исследованиях / В. С. Кустов, А. Г. Дмитриев // Ученые записки Российской Академии предпринимательства. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 40-46. – DOI 10.24182/2073-6258-2023-22-1-40-46. – EDN WPWIJB.
5. Анпилов, С. М. О стратегии развития строительной отрасли РФ (часть I) / С. М. Анпилов, А. Н. Сорочайкин // Эксперт: теория и практика. – 2019. – № 1(1). – С. 7-15. – DOI 10.24411/2686-7818-2019-00011. – EDN TSACKW.
6. Полити, В. В. Строительная отрасль в системе координат национального проектирования: поиск опорных точек / В. В. Полити // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. – 2022. – № 1. – С. 106-120. – DOI 10.24412/2071-6435-2022-1-106-120. – EDN QFDQID.
7. Ереснев, А. М. Строительная отрасль в России. Проблемы и перспективы развития / А. М. Ереснев // НАУКА МОЛОДЫХ - НАУКА БУДУЩЕГО : Сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 27 апреля 2023 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2023. – С. 21-27. – EDN GADAWT.
8. Цифровизация в строительстве, как эффективный инструмент современного развития отрасли / В. Т. Ерофеев, А. А. Пиксайкина, А. Г. Булгаков, В. В. Ермолаев // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 3(12). – С. 9-14. – DOI 10.51608/26867818\_2021\_3\_9. – EDN LJDPKJ.
9. Агафонова, М. С. Особенности функционирования строительных предприятий в условиях пандемии и санкций / М. С. Агафонова, М. А. Мещерякова // Организатор производства. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 63-71. – DOI 10.36622/VSTU.2022.30.4.006. – EDN ORIGON.
10. Russian Federal State Statistics Service. (March 1, 2023). Annual value of construction works in Russia from 2016 to 2022 (in billion Russian rubles) [Graph]. In Statista. Retrieved July 26, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1095550/russia-volume-of-construction-works/>
11. Russian Federal State Statistics Service. (March 1, 2023). Year-over-year construction works value growth in Russia from 2015 to 2022 [Graph]. In Statista. Retrieved July 26, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1143116/russia-construction-works-growth-rate/>
12. Russian Federal State Statistics Service. (February 7, 2023). Annual value of construction works in Russia from 2018 to 2022, by organization's ownership (in billion Russian rubles) [Graph]. In Statista. Retrieved July 26, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1261832/russia-construction-works-value-by-ownership/>
13. В строительной сфере удалось сохранить темп и цели по ключевым объектам // Российская газета. URL: <https://rg.ru/2023/08/11/domashnie-hlopoty.html?ysclid=log3eam74963870537>
14. Социально-экономическое положение России: январь-июнь 2023 года // Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/osn-06-2023.pdf#page=75>
15. Сафина, Г. Л. Исследование рынка труда в строительной сфере / Г. Л. Сафина, Ю. И. Казяба // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 1(43). – С. 78-83. – DOI



10.52684/2312-3702-2023-43-1-78-83. – EDN  
ЕНОЕАО.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 01.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 01.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.



Научная статья

УДК 69.07:531.395

ГРНТИ: 30.19 Механика деформируемого твердого тела; 67 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела; 2.1.9. Строительная механика

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_154

### ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В НЕЛИНЕЙНОДЕФОРМИРУЕМОМ ТЕЛЕ.

#### Часть 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И СООТНОШЕНИЯ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

© Авторы, 2023

SPIN: 7143-6599

**КРУГЛОВ Валерий Михайлович**

доктор технических наук, профессор

*Российский университет транспорта (МИИТ)*

*(Россия, Москва)*

SPIN: 1382-2917

**БАКУШЕВ Сергей Васильевич**

доктор технических наук, профессор

*Пензенский государственный университет архитектуры и*

*строительства (Россия, Пенза)*

SPIN: 7553-3901

**ШЕИН Александр Иванович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Механика»

*Пензенский государственный университет архитектуры и*  
*строительства*

*(Россия, Пенза, e-mail: shein-ai@yandex.ru)*

SPIN: 4425-5045

ORCID 0000-0001-8407-8144

ScopusID: 56662851300

**ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович**

академик РААСН, доктор технических наук, профессор

*Национальный исследовательский Московский государственный*  
*строительный университет*

*(Россия, Москва, e-mail: yerofeevvt@mail.ru)*

SPIN: 5983-9985

**АЛЬ ДУЛАЙМИ Салман Давуд Салман**

кандидат технических наук

*Министерство высшего образования и научных исследований Ирака*  
*(Ирак, Багдад)*

SPIN: 1669-0740

**ТОМИЛОВ Антон Алишерович**

научный сотрудник

*Российский университет транспорта (МИИТ)*

*(Россия, Москва)*

**Аннотация.** В части 1 статьи приведены основные принципы и соотношения механики деформируемого твердого тела. На основании общих уравнений механики деформируемого твёрдого тела показано, что инвариантные величины – среднее нормальное напряжение на октаэдрической площадке  $\sigma_0$ , касательное напряжение на октаэдрической площадке  $\tau_0$ , параметр Лоде-Надаи по напряжениям  $\mu_\sigma$  однозначно определяют напряжённое состояние в точке упругого тела в общем случае напряжённого состояния. В случае плоского напряжённого состояния напряжённое состояние в точке однозначно определяется двумя инвариантами – средним нормальным напряжением на октаэдрической площадке  $\sigma_0$  и касательным напряжением на октаэдрической площадке  $\tau_0$ . При этом для характеристики вида напряжённого состояния целесообразнее применять не угол вида напряжённого состояния  $\psi_\sigma$ , а отношение  $\xi = \sigma_0/\tau_0$ . Что касается деформированного состояния, то инвариантные величины  $\epsilon_0, \gamma_0$  и  $\mu_\epsilon$  – октаэдрическая нормальная(средняя) деформация,



октаэдрическая деформация сдвига и параметр Лодэ-Надаи по деформациям соответственно, однозначно определяют деформированное состояние в точке упругого тела в общем случае деформированного состояния. При плоском деформированном состоянии достаточно иметь два инварианта  $\varepsilon_0$  и  $\gamma_0$ . При этом в качестве параметра, характеризующего вид деформированного состояния, целесообразнее применять не угол вида деформированного состояния  $\psi_\varepsilon$ , а отношение  $\zeta = \varepsilon_0/\gamma_0$ . Приведенные в данной части статьи формулы и соотношения теории напряжений и теории деформаций позволяют получить необходимые зависимости для оценки предельной прочности и деформативности бетона для различных видов напряженно-деформированного состояния, что будет показано в следующей части статьи.

**Ключевые слова:** деформируемое упругое тело; напряжённое состояние в точке; деформированное состояние в точке; механика деформируемого твердого тела

**Для цитирования:** Зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейнодеформируемом теле. Часть 1. Основные принципы и соотношения механики деформируемого твердого тела / В.М. Круглов, С.В. Бакушев, А.И. Шеин, В.Т. Ерофеев, С.Д.С. Аль Дулайми, А.А. Томилов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 154-163. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_154

Original article

## RELATIONSHIPS BETWEEN STRESSES AND DEFORMATIONS IN A NON-LINEAR DEFORMABLE BODY. Part 1. BASIC PRINCIPLES AND RATIOS OF A SOLID DEFORMED BODY MECHANICS

© The Author(s) 2023

**KRUGLOV Valery Mikhailovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Federal State Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (MIIT) (Russia, Moscow)*

**BAKUSHEV Sergey Vasilyevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Penza State University of Architecture and Construction (Penza, Russia)*

**SHEIN Alexander Ivanovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics

*Penza State University of Architecture and Construction (Penza, Russia, e-mail: shein-ai@yandex.ru)*

**EROFEEV Vladimir Trofimovich**

Academician of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor

*National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, Moscow, e-mail: erofeevvt@bk.ru)*

**AL DULAIMI Salman Dawood Salman**

Candidate of Technical Sciences

*Ministry of Higher Education and Scientific Research of Iraq (Iraq, Baghdad)*

**TOMILOV Anton Alisherovich**

Research Associate

*Federal State Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (MIIT) (Russia, Moscow)*



**Abstract.** Part 1 of the article presents the basic principles and ratios of a solid deformed body mechanics. Based on the general equations of the solid deformed body mechanics, it is shown that invariant values are the average normal voltage on the octahedral pad  $\sigma_0$ , the tangent voltage on the octahedral pad  $\tau_0$ , the Lode-Nadai voltage parameter  $\mu_\sigma$  uniquely determines the stress state at the point of the elastic body in the general case of a stress state. In the case of a flat stress state, the stress at the point is uniquely determined by two invariants: the average normal voltage at the octahedral pad  $\sigma_0$  and the tangent voltage on the octahedral pad  $\tau_0$ . At the same time for the characterization of the type of stress, it is more appropriate not to apply the angle of the type of stress  $\psi_\sigma$ , but the ratio  $\xi = \sigma_0/\tau_0$ . For the deformed condition, invariant values  $\varepsilon_0$ ,  $\gamma_0$  and  $\mu_\varepsilon$  – octahedral normal (average) deformation, octahedral shear deformation and Lode-Nadai deformation parameter, respectively, uniquely determine the deformed state at the point of the elastic body in the general deformed condition. In a flat deformed state, it is enough to have two invariants  $\varepsilon_0$  and  $\gamma_0$ . However, as a parameter characterizing the type of deformed state, it is more appropriate to apply not the angle of the deformed state type  $\psi_\varepsilon$  but the ratio  $\xi = \varepsilon_0/\gamma_0$ . The formulas and connections between stress theory and strain theory presented in this part of the article allow us to identify the necessary dependencies for assessing the ultimate strength and deformability of concrete for various types of strained states, which will be demonstrated in the following part.

**Keywords:** deformable elastic body; stress at point; deformed condition at point; solid deformed body mechanics

**For citation:** Relationships between stresses and deformations in a non-linear deformable body. Part 1. Basic principles and ratios of a solid deformed body mechanics / V.M. Kruglov, S.V. Bakushev, A.I. Shein, V.T. Erofeev, S.D.S. Al Dulaimi, A.A. Tomilov // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 154-163. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_154

## Введение

Современная механика деформируемого твердого тела – одна из фундаментальных естественных наук, включающая совокупность дисциплин, рассматривающих различные вопросы поведения твёрдого тела под действием внешней нагрузки или какого-либо иного механического воздействия. К совокупности рассматриваемых дисциплин относятся теория упругости, теория пластичности, теория ползучести, теория разрушения, теория сыпучей среды и грунтов, строительная механика и т.д. Наиболее общим всех этих дисциплин является феноменологический подход, связанный созданием математической модели, достаточно простой для возможности решения поставленных задач, и как можно более точно описывающей физическую сущность явления [1]. Целью расчета в этом случае является определение напряжённо-деформированного состояния твёрдого тела для обеспечения прочности, жёсткости, устойчивости и надёжности сооружения.

Основой механики деформируемого твёрдого тела, её теоретическим фундаментом, является теория упругости, берущая своё начало ещё от работ Галилея (1638 г.). Теория упругости как стройная научная дисциплина зародилась в начале XIX столетия, когда почти одновременно Л. Навье (1821 г.) [2], А. Коши (1822 г.) [3] и С. Пуассон (1829 г.) [4] вывели общие уравнения равновесия и движения упругих тел и дали правильную постановку соответствующих задач [5]. Характерной чертой данного варианта теории упругости является линейность всех его формул относительно искомых величин (перемещений, деформаций, напряжений и их производных). Линейная теория упругости не утратила своего значения и в настоящее время. Существует обширный класс задач, для которых линейная теория упругости даёт достаточно удовлетворительные результаты. Вместе с тем уравнения линейной теории упругости являются довольно грубым приближением при описании и

прогнозировании механического поведения твёрдых тел в реальной постановке. Это находит своё объяснение, прежде всего, в тех допущениях и предпосылках, которые положены в основу линейной теории упругости [6-7].

Из всего сказанного следует, что современный курс теории упругости, как на это указывал В.В. Новожилов [8] должен базироваться на общей (нелинейной) теории напряжений и деформаций, основанной лишь на гипотезах о сплошности и однородности деформируемого твердого тела.

Основы нелинейной теории упругости были заложены работами А.Ж.К. Барре де Сен-Венана [9], Г. Кирхгофа [10], Й. Фингера [11] и других ученых механиков. В ранних трудах достаточно подробно и предельно строго освещался весь комплекс вопросов, рассматриваемых данной дисциплиной. В последние годы вопросам нелинейной теории деформируемого твердого тела посвящены многочисленные работы [12-15].

В настоящее время, ввиду широкого использования программно-математического обеспечения персональных компьютеров, появились возможности решать задачи механики деформируемого твердого тела и строительной механики в строгой постановке с максимальным учетом реальной работы конструкции и механических свойств материала. Интерес исследователей, проектировщиков и инженеров к вопросам расчета строительных конструкций с учетом геометрической и физической нелинейности не только не ослабевает, но и более того, приобретает все более широкий размах при расчете стержневых, плоских и пространственных конструкций [16-18].

Изложение нелинейной теории упругости после работ В.В. Новожилова [8; 19-20] было продолжено в работах А.И. Лурье [21-23], А.Н. Гузя [24-25], Л.А. Толоконникова [26], С.В. Бакушева [27-29], А.И. Шеина [30-32.] и других исследователей.

Вместе с тем, однако, физически и геометрически нелинейная теория упругости



находит свое практическое применение в основном лишь при расчете гибких конструкций (стержни, пластинки, структуры, оболочки и т. п.) [33-34] и совершенно не применяется для расчета более массивных тел. Именно расчет массивных тел с более сложными реологическими свойствами требует щепетильного отношения к используемой теории.

К нелинейно деформированным средам относятся многие строительные материалы. Среди них основное место занимают бетонные и железобетонные строительные конструкции. Конструкции из бетона и железобетона широко применяются в промышленно-гражданском, транспортном и специальном строительстве. По этой причине для полного понимания работы и возможности прогнозирования поведения бетонных и железобетонных конструкций под нагрузкой, при построении основных физических соотношений в нелинейно деформируемых анизотропных средах, к которым относится бетон, необходимо опираться на методы физически и геометрически нелинейной механики деформируемого твердого тела.

#### *Основные уравнения линейной теории упругости*

Напряженно-деформированное состояние в точке нелинейно-упругого тела, подчиняющегося аксиоме затвердевания, может быть охарактеризовано тремя группами зависимостей линейной теории упругости. Первая группа включает в себя уравнения равновесия

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + P_x(x, y, z) &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + P_y(x, y, z) &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + P_z(x, y, z) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – компоненты напряжений;  $P_x, P_y, P_z$  – проекции внешних сил, действующих на поверхности тела на оси декартовой системы координат.

Вторая группа представляет собой геометрические уравнения, которые устанавливают связь между перемещениями  $u, v, w$  и деформациями  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  тела.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  – компоненты деформации;

$u, v, w$  – перемещения точки вдоль осей декартовой системы координат.

Деформации тела связаны между собой уравнениями неразрывности Сен-Венана.

Уравнения (1.1) и (1.2) для сплошных сред являются универсальными и не зависят от вида материала и его физических свойств. Вид материала и особенности его деформирования могут быть

учтены только в уравнениях третьей группы, устанавливающих зависимости между напряжениями и деформациями в точке тела. Такие уравнения называют основными физическими или определяющими соотношениями. Для однородного упругого тела, обладающего анизотропией общего вида, зависимость между напряжениями и деформациями описывается линейным законом (обобщенным законом Гука):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + \dots + A_{16}\gamma_{zx}; \\ \sigma_y &= A_{21}\varepsilon_x + A_{22}\varepsilon_y + \dots + A_{26}\gamma_{zx}; \\ \tau_{zx} &= A_{61}\varepsilon_x + A_{62}\varepsilon_y + \dots + A_{66}\gamma_{zx}. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Здесь, в случае неоднородного упругого тела  $A_{ij} = f(x, y, z)$ .

Для однородного упругого тела коэффициенты  $A_{ij}$  величины постоянные.

Если определитель шестого порядка матрицы коэффициентов системы (1.3) не равен нулю, то системе уравнений (1.3) можно разрешить относительно деформаций, то есть выразить деформации через напряжения.

Для изотропного упругого тела закон Гука удобнее записать в виде следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x - \sigma_0 &= 2G(\varepsilon_x - \varepsilon_0); \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \\ \sigma_y - \sigma_0 &= 2G(\varepsilon_y - \varepsilon_0); \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}; \\ \sigma_z - \sigma_0 &= 2G(\varepsilon_z - \varepsilon_0); \quad \tau_{zx} = G\gamma_{zx}, \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

причем, связь между средним напряжением  $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$  и средней деформацией  $\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$  описывается законом:

$$\sigma_0 = \frac{E}{1-2\mu} \varepsilon_0. \quad (1.6)$$

В формулах (1.5) и (1.6)  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $G$  – модуль сдвига материала упругого тела, причем,

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (1.7)$$

В совокупности уравнения (1.1), (1.2) и (1.3) содержат 15-ть уравнений с 15-ю неизвестными (шесть компонент деформации, шесть компонент напряжений и три перемещения). С учетом граничных условий получаем не нулевое решение указанной системы уравнений.

Поскольку указанная система содержит и алгебраические и дифференциальные уравнения в частных производных, то для разрешения рассматриваемой системы уравнений прибегают к численным методам механики деформируемого твердого тела и, в частности, к наиболее распространенному из них – методу конечных элементов.

#### *Соотношения теории напряжений*

Напряжения в точке упругого тела в общем случае составляют тензор напряжений вида

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (1.8)$$



Тензор (1.8) раскладывается на компоненты – шаровой тензор  $T_{\sigma_0}$  и девиатор тензора напряжений (или просто девиатор напряжений)  $D_{\sigma}$ :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = T_{\sigma_0} + D_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{31} & s_{33} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_0 & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma_0 & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{31} & \sigma_{33} - \sigma_0 \end{bmatrix}. \quad (1.9)$$

Для изотропного тела шаровой тензор напряжений характеризует всестороннее или гидростатическое напряжённое состояние в точке, а девиатор – описывает меру отклонения напряжённого состояния в точке от состояния всестороннего растяжения или сжатия. С шаровым тензором напряжений связано понятие среднего нормального напряжения  $\sigma_0$ , действующего на октаэдрической площадке, то есть площадке, равнонаклонённой к направлениям главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  в деформируемых средах:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (1.10)$$

С девиатором напряжений связывается касательное напряжение  $\tau_0$ , действующее по той же октаэдрической площадке:

$$\tau_0 = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1.11)$$

Поскольку и среднее нормальное напряжение  $\sigma_0$ , и октаэдрическое касательное напряжение  $\tau_0$  выражаются через главные напряжения, являющиеся инвариантами, то и величины  $\sigma_0$  и  $\tau_0$  также являются инвариантами, то есть не зависящими от ориентации рассматриваемой октаэдрической площадки и остающиеся неизменными по величине при поворотах осей декартовой системы координат.

При оценке напряжённого состояния твёрдого тела как правило рассматриваются три инвариантных величины – первый вариант тензора напряжений  $I_1(T_{\sigma})$ , второй  $J_2(D_{\sigma})$  и третий  $J_3(D_{\sigma})$  инварианты девиатора напряжений

$$I_1(T_{\sigma}) = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_0; \quad (1.12)$$

$$J_2(D_{\sigma}) = -(s_{11}s_{22} + s_{22}s_{33} + s_{33}s_{11} - s_{12}^2 - s_{23}^2 - s_{31}^2); \quad (1.13)$$

$$J_3(D_{\sigma}) = s_{11}s_{22}s_{33} + 2s_{12}s_{23}s_{31} - s_{11}s_{23}^2 - s_{22}s_{31}^2 - s_{33}s_{12}^2, \quad (1.14)$$

где  $s_{ij}$  – соответствующие компоненты девиатора напряжений  $D_{\sigma}$  (см. 1.9).

Приведем еще одно выражение для  $\tau_0$  с учетом (1.13)

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2}{3}J_2(D_{\sigma})}. \quad (1.15)$$

Важной характеристикой напряженного состояния является коэффициент Лодэ-Надаи по напряжениям [35].

$$\mu_{\sigma} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} + 1, \quad (1.16)$$

причём  $-1 < \mu_{\sigma} < +1$ .

При этом в соответствии с работой [35], главные напряжения будут определяться зависимостями:

$$\sigma_1 = \left(1 - \frac{\mu_{\sigma}}{3}\right)\tau_0; \quad \sigma_2 = \frac{2}{3}\mu_{\sigma}\tau_0; \quad \sigma_3 = -\left(1 + \frac{\mu_{\sigma}}{3}\right)\tau_0. \quad (1.17)$$

Знаменатель в формулах (1.16) можно представить так [36]

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_0 \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{3 + \mu_{\sigma}^2}}. \quad (1.18)$$

Тогда главные напряжения можно будет определить из соотношений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_0 + \frac{3 - \mu_{\sigma}}{\sqrt{2}\sqrt{3 + \mu_{\sigma}^2}}\tau_0; \\ \sigma_2 &= \sigma_0 + \frac{\sqrt{2}\mu_{\sigma}}{\sqrt{3 + \mu_{\sigma}^2}}\tau_0; \\ \sigma_3 &= \sigma_0 - \frac{3 + \mu_{\sigma}}{\sqrt{2}\sqrt{3 + \mu_{\sigma}^2}}\tau_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

Причем между главными напряжениями с учетом их знаков принята зависимость:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .

Уравнения (1.19) устанавливают связь между величинами главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  и величинами  $\sigma_0, \tau_0$  и  $\mu_{\sigma}$ .

Дадим геометрическую интерпретацию величин  $\sigma_0, \tau_0$  и  $\mu_{\sigma}$ . Выберем декартову систему координат  $X, Y, Z$  таким образом, чтобы ось  $Z$  была равнонаклонена к осям  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  (рис. 1а, 1б), то есть совпадала с направлением среднего нормального напряжения  $\sigma_0$ . Выберем в пространстве напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  произвольную точку  $S$  и проведем через нее плоскость, также равнонаклонённую к осям главных напряжений. Такая плоскость является девиаторной плоскостью, а ось  $Z$  является нормалью к этой плоскости. Тогда, вводя цилиндрические координаты  $Z, R, \theta$ , нетрудно убедиться, что положение точки  $S$  описывается уравнениями  $Z = |\vec{04}| = \sqrt{3}\sigma_0; R = |\vec{4S}| = \sqrt{3}\tau_0; \theta = \arccos \frac{3 + \mu_{\sigma}}{2\sqrt{3 + \mu_{\sigma}^2}};$

$$(1.20)$$

Таким образом величина  $\sigma_0$  определяет положение девиаторной плоскости,  $\tau_0$  – величину радиуса-вектора, лежащего в этой плоскости, а параметр  $\mu_{\sigma}$ , характеризующий вид напряженного состояния и связанный с углом  $\theta$ , – направление вектора  $\vec{0S}$  (см. рис. 1) и, следовательно, положение соответствующей меридиональной плоскости  $04S$  (в других обозначениях – плоскость  $\sigma_0 \sim \tau_0$ ) в пространстве главных напряжений.

Из (1.20), а также рис. 1, следует, что угол  $\theta$  изменяется от  $0^\circ$  при  $\mu_{\sigma} = +1$  (одноосное растяжение) до  $60^\circ$  при  $\mu_{\sigma} = -1$  (одноосное сжатие). Нулевому значению угла  $\theta$  отвечает вид напряженного состояния, для которого  $\mu_{\sigma} = +1$ .

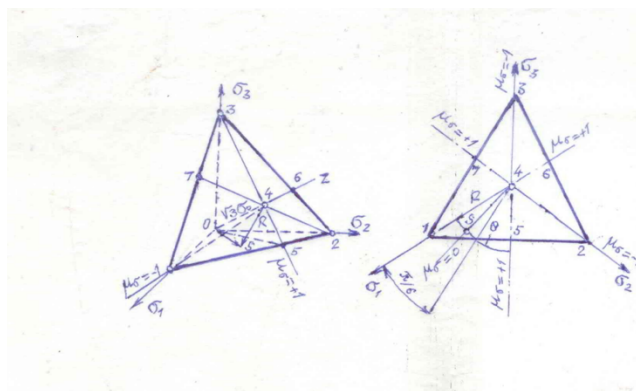


Рис. 1. К геометрической интерпретации инвариантов.

Несложно показать, используя выражения для главных напряжений в тригонометрической форме [37]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_0 + \frac{2}{3} \sigma_i \cos \psi_\sigma; \\ \sigma_2 &= \sigma_0 + \frac{1}{3} \sigma_i (-\cos \psi_\sigma + \sqrt{3} \sin \psi_\sigma); \\ \sigma_3 &= \sigma_0 - \frac{1}{3} \sigma_i (\cos \psi_\sigma + \sqrt{3} \sin \psi_\sigma), \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

что параметр  $\mu_\sigma$  связан с величиной  $\psi_\sigma$  соотношением

$$\mu_\sigma = \sqrt{3} \tan \psi_\sigma. \quad (1.22)$$

Учитывая границы изменения параметра Лоде-Надаи:  $-1 < \mu_\sigma < +1$ , величина  $\psi_\sigma$  будет изменяться в пределах  $-\frac{\pi}{6} \leq \psi_\sigma \leq +\frac{\pi}{6}$ . Величина  $\psi_\sigma$  может быть определена из выражения [37-38]

$$\cos 3\psi_\sigma = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3(D_\sigma)}{\sqrt{[J_2(D_\sigma)]^3}} \quad (1.23)$$

и называется углом вида напряжённого состояния.

Выражения для главных напряжений могут быть представлены в тригонометрической форме путём решения известного кубического уравнения теории напряжений [36; 38-40]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_0 - \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2(D_\sigma)} \sin\left(\psi_\sigma - \frac{2}{3}\pi\right); \\ \sigma_2 &= \sigma_0 - \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2(D_\sigma)} \sin \psi_\sigma; \\ \sigma_3 &= \sigma_0 - \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2(D_\sigma)} \sin\left(\psi_\sigma - \frac{4}{3}\pi\right). \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

Таким образом инварианты  $\sigma_0, \tau_0$  и  $\mu_\sigma$  однозначно определяют напряжённое состояние в точке в общем случае объёмного напряжённого состояния.

Особый интерес представляет плоское напряжённое состояние, когда одно из главных напряжений равно нулю. В этом случае размерность решаемой задачи и количество ее параметров существенно уменьшаются.

Представим угол вида напряжённого состояния  $\psi_\sigma$  в форме [42]

$$\sin 3\psi_\sigma = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_0}{\sqrt{J_2(D_\sigma)}} \left[1 - \frac{\sigma_0^2}{J_2(D_\sigma)}\right] \quad (1.25)$$

или с учетом (1.15)

$$\sin 3\psi_\sigma = -\frac{3}{2} \frac{\sigma_0}{\tau_0} \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_0}{\tau_0}\right)^2\right]. \quad (1.26)$$

Таким образом в плоском напряжённом состоянии достаточно иметь два инварианта  $\sigma_0$  и  $\tau_0$ . При этом в качестве параметра, характеризующего вид напряжённого состояния, целесообразнее применять не угол  $\psi_\sigma$ , а отношение  $\xi = \sigma_0/\tau_0$ . С этим отношением удобнее работать, так как для каждого вида напряжённого состояния оно сохраняет постоянное значение, а именно: при одноосном равномерном растяжении  $\xi = \sqrt{2}/2$ ; чистом сдвиге  $\xi = 0$ ; одноосном сжатии  $\xi = -\sqrt{2}/2$  и т.д. Тогда компоненты главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , выраженные через параметры  $\xi$  и  $\tau_0$ , можно определить так

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau_0 (\sqrt{3}\xi \pm \sqrt{2 - \xi^2}). \quad (1.27)$$

Здесь следует сказать несколько слов об определении положения главных площадок (по которым действуют только главные напряжения). Это весьма существенный вопрос при определении ориентации трещин в бетоне, как будет показано далее.

Направление каждого главного напряжения  $\sigma_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) определяется направляющими косинусами  $l_{ij}$ , ( $j = 1, 2, 3$ ) нормали к площадке действия этого напряжения из известных соотношений [41]:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_x - \sigma_i)l_{i1} + \tau_{xy}l_{i2} + \tau_{xz}l_{i3} &= 0; \\ \tau_{yx}l_{i1} + (\sigma_y - \sigma_i)l_{i2} + \tau_{yz}l_{i3} &= 0; \\ \tau_{zx}l_{i1} + \tau_{zy}l_{i2} + (\sigma_z - \sigma_i)l_{i3} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

$$l_{i1}^2 + l_{i2}^2 + l_{i3}^2 = 1. \quad (1.26)$$

Здесь  $l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}$  — направляющие косинусы нормали к площадке с главным напряжением  $\sigma_i$  относительно осей X, Y, Z.

Для определения направляющих косинусов нормалей к главным площадкам следует воспользоваться формулами [43]:

$$l_{ix}^2 = \frac{b_i^2}{d_i^2}; \quad l_{iy}^2 = \frac{c_i^2}{d_i^2}; \quad l_{iz}^2 = \frac{a_i^2}{d_i^2}, \quad (1.27)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_i^2 &= (\sigma_x - \sigma_i)(\sigma_y - \sigma_i) - \tau_{xy}^2; \\ b_i^2 &= \tau_{xy}\tau_{yz} - \tau_{xz}(\sigma_y - \sigma_i); \\ c_i^2 &= \tau_{xy}\tau_{xz} - \tau_{yz}(\sigma_x - \sigma_i); \\ d_i^2 &= a_i^2 + b_i^2 + c_i^2. \end{aligned}$$

Здесь  $l_{ix} = \cos(\sigma_i, X); l_{iy} = \cos(\sigma_i, Y); l_{iz} = \cos(\sigma_i, Z); i = 1, 2, 3$ .

#### Соотношения теории деформаций

Деформированное состояние в точке упругого тела описывается тензором деформации вида

$$T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}. \quad (1.28)$$

Тензор (1.28) раскладывается на компоненты – шаровой тензор  $T_{\varepsilon_0}$  и девиатор тензора деформации  $D_{\varepsilon}$ :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = T_{\varepsilon_0} + D_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \varepsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} - \varepsilon_0 & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} - \varepsilon_0 & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{31} & \varepsilon_{33} - \varepsilon_0 \end{bmatrix}. \quad (1.29)$$

Для изотропного тела шаровой тензор деформации характеризует изменение объёма, а девиатор – изменение формы тела.

В формуле (1.29)  $\varepsilon_0$  – октаэдрическая нормальная (средняя) деформация.

Октаэдрическая нормальная (средняя) деформация  $\varepsilon_0$  связана с шаровым тензором деформации; с девиатором деформации связывается октаэдрическая деформация сдвига  $\gamma_0$ , причём  $\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ ; (1.30)

$$\gamma_0 = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)} =$$

$$= \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} = 2 \sqrt{\frac{2}{3}} J(D_{\varepsilon}); \quad (1.31)$$

Здесь  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные деформации.

При оценке деформированного состояния твёрдого тела в основном рассматриваются три инвариантных величины – первый инвариант тензора деформации  $I_1(T_{\varepsilon})$ , второй  $J_2(D_{\varepsilon})$  и третий  $J_3(D_{\varepsilon})$  инварианты девиатора деформации

$$I_1(T_{\varepsilon}) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 3\varepsilon_0; \quad (1.32)$$

$$J_2(D_{\varepsilon}) = -\left(e_{11}e_{22} + e_{22}e_{33} + e_{33}e_{11} - \frac{1}{4}e_{12}^2 - \frac{1}{4}e_{23}^2 - \frac{1}{4}e_{31}^2\right); \quad (1.33)$$

$$J_3(D_{\varepsilon}) = e_{11}e_{22}e_{33} + \frac{1}{4}e_{12}e_{23}e_{31} - \frac{1}{4}(e_{11}e_{23}^2 + e_{22}e_{31}^2 + e_{33}e_{12}^2). \quad (1.34)$$

По аналогии с напряжённым состоянием, вводится параметр Лоде-Надаи по деформациям:

$$\mu_{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}; \quad (1.35)$$

Аналогично главным напряжениям  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  главные деформации можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_0 + \frac{3-\mu_{\varepsilon}}{2\sqrt{2}\sqrt{3+\mu_{\varepsilon}}} \gamma_0; \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_0 + \frac{\sqrt{2}\mu_{\varepsilon}}{2\sqrt{3+\mu_{\varepsilon}}} \gamma_0; \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_0 - \frac{3+\mu_{\varepsilon}}{2\sqrt{2}\sqrt{3+\mu_{\varepsilon}}} \gamma_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

Отсюда следует, что инварианты  $\varepsilon_0, \gamma_0$  и  $\mu_{\varepsilon}$  однозначно определяют деформированное состояние в точке в общем случае объёмного деформированного состояния.

Переходя к цилиндрической системе координат (см. рис. 1) и вводя подобно  $\psi_{\sigma}$  величину

$$\psi_{\varepsilon} = \arctg\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\mu_{\varepsilon}\right), \quad (1.37)$$

получим

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_0 - \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2(D_{\varepsilon})} \sin\left(\psi_{\varepsilon} - \frac{2\pi}{3}\right); \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_0 - \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2(D_{\varepsilon})} \sin\psi_{\varepsilon}; \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_0 - \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2(D_{\varepsilon})} \sin\left(\psi_{\varepsilon} - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1.38)$$

Величину  $\psi_{\varepsilon}$  назовем углом вида деформированного состояния, ее можно определить из формулы

$$\sin 3\psi_{\varepsilon} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3(D_{\varepsilon})}{\sqrt{[J_2(D_{\varepsilon})]^2}}. \quad (1.39)$$

Вполне понятно, используя аналогию напряжённого и деформированного состояний, что в плоском деформированном состоянии достаточно иметь два инварианта  $\varepsilon_0$  и  $\gamma_0$ . При этом в качестве параметра, характеризующего вид деформированного состояния, целесообразнее применять не угол  $\psi_{\varepsilon}$ , а отношение  $\zeta = \varepsilon_0/\gamma_0$ .

Для определения направления главных деформаций–направляющих косинусов  $t_{i1}, t_{i2}, t_{i3}$  главных направлений, при известных главных деформациях  $\varepsilon_i, (i = 1, 2, 3)$ , следует воспользоваться решением системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} 2(\varepsilon_x - \varepsilon_i)t_{i1} + \gamma_{xy}t_{i2} + \gamma_{xz}t_{i3} &= 0; \\ \gamma_{yx}t_{i1} + 2(\varepsilon_y - \varepsilon_i)t_{i2} + \gamma_{yz}t_{i3} &= 0; \\ \gamma_{zx}t_{i1} + \gamma_{zy}t_{i2} + 2(\varepsilon_z - \varepsilon_i)t_{i3} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.40)$$

$$\text{с учётом того, что } t_{i1}^2 + t_{i2}^2 + t_{i3}^2 = 1. \quad (1.41)$$

Для решения системы (1.40) можно воспользоваться формулами, аналогичными (1.27):

$$t_{ix}^2 = \frac{b_i^2}{d_i^2}; \quad t_{iy}^2 = \frac{c_i^2}{d_i^2}; \quad t_{iz}^2 = \frac{a_i^2}{d_i^2}, \quad (1.42)$$

$$\text{где } a_i^2 = (\varepsilon_x - \varepsilon_i)(\varepsilon_y - \varepsilon_i) - \frac{1}{4}\gamma_{xy}^2;$$

$$b_i^2 = \frac{1}{4}\gamma_{xy}\gamma_{yz} - \frac{1}{2}\gamma_{xz}(\varepsilon_y - \varepsilon_i);$$

$$c_i^2 = \frac{1}{4}\gamma_{xy}\gamma_{xz} - \frac{1}{2}\gamma_{yz}(\varepsilon_x - \varepsilon_i);$$

$$d_i^2 = a_i^2 + b_i^2 + c_i^2.$$

## Заключение

Полученные в статье соотношения теории напряжений

и теории деформаций необходимы в дальнейших исследованиях.

В частности, теория напряжений необходима при построении условий предельной прочности (критерия прочности) бетона для разных видов напряженного состояния.

Предельная поверхность, характеризующая предельное сопротивление напряжениям различного вида в бетоне, представляет собой неротационный конус (Рис. 2).

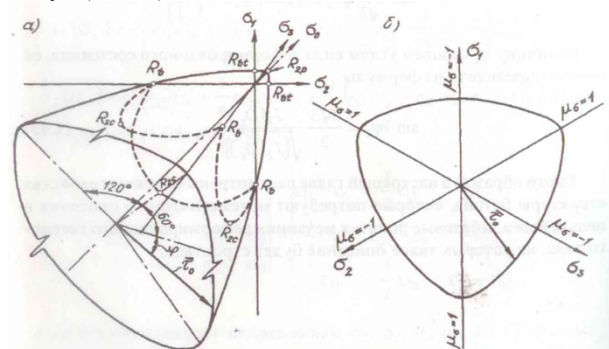


Рис. 2. Поверхность предельной прочности бетона  
а) общий вид поверхности; б) девиаторное сечение поверхности в области сжимающих напряжений





Ось этого конуса совпадает с осью среднего напряжения. Девиаторное сечение конуса представляет собой криволинейный равнобедренный треугольник, изменяющий свою форму от круга при чисто гидростатическом разрушающем сжатии до равнобедренного треугольника при трехстороннем равномерном растяжении.

Теории напряжений и деформаций позволят получить необходимые зависимости для оценки прочности различных видов напряженно-деформированного состояния, что будет показано в следующей части статьи.

#### Выводы

1. Показано, что напряженно-деформированное состояние в точке упругого тела в общем случае может быть охарактеризовано тремя группами зависимостей: уравнениями равновесия, геометрическими соотношениями и физическими уравнениями.

2. Показана связь шарового тензора напряжения со средним нормальным напряжением, а также связь девиатора напряжений с октаэдрическим касательным напряжением. Показана важность для характеристики напряженного состояния твердых тел коэффициента Ладе-Надои по напряжениям.

3. Показана связь шарового тензора деформаций с октаэдрической нормальной (средней) деформацией, а также связь девиатора деформаций с октаэдрической деформацией сдвига. Показана важность для характеристики напряженного состояния твердых тел коэффициента Ладе-Надои по деформациям.

4. Показано, что инвариантные величины – среднее нормальное напряжение на октаэдрической площадке  $\sigma_0$ , касательное напряжение на октаэдрической площадке  $\tau_0$ , параметр Лоде-Надаи по напряжениям  $\mu_\sigma$  однозначно определяют напряженное состояние в точке упругого тела в общем случае напряженного состояния. В случае плоского напряженного состояния напряженное состояние в точке однозначно определяется двумя инвариантами –  $\sigma_0$  и  $\tau_0$ .

5. Показано, что инвариантные величины  $\varepsilon_0$ ,  $\gamma_0$  и  $\mu_\varepsilon$  – октаэдрическая нормальная (средняя) деформация, октаэдрическая деформация сдвига и параметр Лоде-Надаи по деформациям соответственно, однозначно определяют деформированное состояние в точке упругого тела в общем случае деформированного состояния. При плоском деформированном состоянии достаточно иметь два инварианта  $\varepsilon_0$  и  $\gamma_0$ .

6. Показано, что для характеристики вида напряженного состояния целесообразнее применять не угол вида напряженного состояния  $\psi_\sigma$ , а отношение  $\xi = \sigma_0/\tau_0$ . В качестве параметра, характеризующего вид деформированного состояния, целесообразнее применять не угол вида

деформированного состояния  $\psi_\varepsilon$ , а отношение  $\zeta = \varepsilon_0/\gamma_0$ .

7. Полученные в данной части статьи соотношения теории напряжений и теории деформаций использованы в дальнейших исследованиях. Они позволяют получить необходимые зависимости для оценки различных видов напряженно-деформированного состояния бетонов, что будет показано в следующей части статьи.

#### Библиографический список

1. Гениев Г.А., Лейтес В.С. Вопросы механики неупругих тел. - М.: "Стройиздат". - 1981. - 160с.
2. Navier C.L., Memoire sur les lois de l'equilibre et du mouvement des corps solides elastiques, Met. Acad. Sci. Inst. France, 1827.
3. Cauchy A.L., De la pression ou tension dans un corps solide, Ex. de Math., 1827.
4. Poisson S., Memoire sur l'equilibre et le mouvement des corps elastiques, Met. Acad. Sci. Inst. France (1829).
5. Новожилов В.В. *Теория упругости*. «Судпромгиз». - 1958. - 370с.
6. Подгорный А.Н., Марченко Г.А., Пустынников В.И. Основы и методы прикладной теории упругости: Учеб. пособие для вузов. - Киев: Вища школа. Головное изд-во. - 1981. – 328 с.
7. Безухов Н.И., Лужин О.В. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. Учеб. пособие для вузов. М., "Высш. школа". - 1974. - 200с.
8. Новожилов В.В. *Теория упругости*. «Судпромгиз». - 1958. - 370с.
9. A.J.B. de St. Venant, Memoire sur l'equilibre des corps solides, dans les limites de leur elasticite, et sur les conditions de leur resistance, quand les déplacements eprouves par leurs points ne sont pas tres petits, C.R. Acad. Sci., Paris, 24, 1847.
10. Kirchhoff G., Ueber die Gleichungen des Gleichgewichts eines elastischen Körpers bei nichtunendlich kleinen Verschiebungen seiner Theile, Acad. Wiss. Wien Sitzungsberichte, IX, 1852.
11. Finger J., Über die allgemeinsten Beziehungen zwischen Deformationen und den zugehörigen Spannungen in aeolotropen und isotropen Substanzen, Acad. Wiss. Wien Sitzungsberichte (IIa), 103, 1894.
12. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: в 2 ч. Часть II. Конечные деформации: пер. с англ. / под ред. А.П. Филина. М.: Наука, 1984. – 432 с.



13. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. – 512 с.
14. Гениев Г.А., Лейтес В.С. Вопросы механики неупругих тел. М.: Стройиздат, 1981. – 160 с.
15. Александрович А.И., Горлова А.В. Исследование плоской задачи для физически нелинейного упругого тела методами теории функций комплексного переменного. // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. 2007. № 3. С. 63–72
16. Лукаш П.А. Расчёт пологих оболочек и плит с учётом физической и геометрической нелинейности. - В сб.: Расчёт конструкций, работающих в упругопластической стадии. Под ред А.В.Геммерлинга. М., Госстройиздат, 1961 (ЦНИИСК).
17. Петров В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. – Саратов: изд. Саратовского ун-та, 1975 – 119 с.
18. Толоконников А.А. О связи между напряжениями и деформациями в нелинейной теории упругости. - ПММ, 1956, Вып. 20, № 3.
19. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. Гостехиздат. - 1948. - 211с.
20. Новожилов В.В. *Теория упругости.* «Судпромгиз». - 1958. - 370с.
21. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. - М.: Наука. - 1980. - 512с.
22. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости, Гостехиздат. - 1955.
23. Лурье А.И. Теория упругости. - М.: Наука. - 1970. - 939с.
24. Гузь А.Н. Основы трёхмерной теории устойчивости деформируемых тел. - К.: Вища шк. Головное изд.-во. - 1986. - 511с.
25. Гузь А.Н. Устойчивость упругих тел при конечных деформациях. - К.: Наук. думка. - 1973. - 274с.
26. Толоконников Л.А. Механика деформируемого твёрдого тела: Учеб. пособие для втузов. - М.: Высш. школа. - 1979. - 318с.
27. Бакушев С. В. Разрешающие дифференциальные уравнения физически-нелинейной теории упругости в напряжениях для плоской деформации / С. В. Бакушев // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. – 2020. – № 63. – С. 72–86.
28. Бакушев С. В. Уравнения физически нелинейной теории упругости в напряжениях / С. В. Бакушев // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 117-123.
29. Бакушев С. В. Плоская задача физически нелинейной теории упругости - решение в напряжениях / С. В. Бакушев // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 1(18). – С. 82-88.
30. Шеин А. И. Потеря устойчивости напряжённо-деформированного состояния физически нелинейных стержневых систем / А. И. Шеин // Материалы XXX научно-технической конференции. – Пенза: ПГАСА, 1999. – С. 133-134.
31. Шеин А. И. Оценка напряженно-деформированного состояния и оптимизация железобетонных колонн / А. И. Шеин // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 2-3. – С.4-8.
32. Шеин А. И. Расчет нелинейных композитных систем с учетом фибровых разрушений / А. И. Шеин // Материалы всероссийской XXXI научно-технической конференции. – Пенза: ПГАСА, 2001. – С. 148-149.
33. Петров В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. – Саратов: изд. Саратовского ун-та, 1975 –119с.
34. Петров В.В., Овчинников И.Г., Иноземцев В.К. Деформирование элементов конструкций из нелинейного разномодульного неоднородного материала. - Саратов, изд. СПИ, 1989 – 160с.
35. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. - М., 1954. –648с.
36. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела. т. 1., Главная редакция физико-математической литературы изд-во «Наука», 1975, стр. 832.
37. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие / Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. – Киев: Наук. Думка, 1981. – 496 с.
38. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М., 1975. - 400 с.
39. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. -М., 1968. - 512 с.
40. Работнов Ю.М. Механика деформируемого твердого тела. - М., 1987. -712 с.
41. Круглов В.М. Нелинейные соотношения и критерий прочности бетона в трёхосном напряженном состоянии. //Строительная механика и расчет сооружений. -1987. -№1. - С. 40-48.
42. Круглов В.М., Ерофеев В.Т., Ватин Н.И., Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Вариант деформационной теории пластичности бетона в плоском напряжённом состоянии. / Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2019, №4, Том 6, 12 с.
43. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. Совет: К.В. Фролов (пред.) и др. - М.: Машиностроение. Динамика и прочность машин. Теория



механизмов и машин. Т. 1-3. В 2-х кн. Кн. 1 / К.С.  
Колесников, Д.А. Александров, В.К. Асташев и  
др.; Под общ. ред. К.С. Колесникова. 1994. - 534  
с, ил.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 26.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 26.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.



Научная статья

УДК 539.3

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела; 2.1.9. Строительная механика

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_164

## ЛИНЕАРИЗОВАННЫЕ ФОРМЫ УРАВНЕНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН

© Авторы, 2023

SPIN: 5367-3070

AuthorID: 266980

ORCID 0000-0002-5722-262X

ScopusID: 7101745424

ResearcherID: A-3737-2017

**СОКОЛОВА Марина Юрьевна**

доктор физико-математических наук, доцент, профессор  
кафедры

*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: m.u.sokolova@gmail.com)*

SPIN: 9444-3341

AuthorID: 266980

ORCID 0000-0002-1628-0196

ScopusID: 37120421000

ResearcherID: N-4946-2016

**ХРИСТИЧ Дмитрий Викторович**

доктор физико-математических наук, доцент, профессор  
кафедры

*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: dmitrykhristich@rambler.ru)*

**Аннотация.** Рассматривается распространение акустических волн в нелинейно упругих средах с конечными предварительными деформациями. Среда в начальном состоянии однородна с упругим потенциалом полиномиального вида, в котором сохраняются два первых ненулевых члена разложения в ряд по степеням тензора деформаций. В зависимости от конкретной структуры тензоров упругости, стоящих в потенциале, соотношения можно использовать как для изотропных, так и для анизотропных сред с различными типами симметрии упругих свойств. Получены динамические уравнения распространения малых возмущений перемещений, которые конкретизированы для случая плоской монохроматической волны. Рассмотрены несколько вариантов линеаризации динамических уравнений. В первом варианте предполагается, что предварительные деформации являются малыми, предварительные вращения также малы или отсутствуют. Второй вариант линеаризации задачи о распространении упругих волн построен в предположении, что при допущениях предыдущего варианта определяющие соотношения устанавливают квадратичную связь между тензором напряжений Коши и линейным тензором деформаций. В третьем варианте предполагается, что предварительные деформации являются конечными, волна распространяется в актуальной конфигурации, но связь между напряжениями и деформациями является тензорно линейной. Выполнены расчеты фазовых скоростей распространения волн в предварительно сжатом стержне из полиамида. Результаты расчетов показали хорошее соответствие данным известных экспериментов.

**Ключевые слова:** акустические волны; конечные деформации; фазовые скорости распространения волн; константы упругости второго и третьего порядков; механика деформируемых тел

**Для цитирования:** Соколова М.Ю., Христоч Д.В. Линеаризованные формы уравнений распространения упругих волн // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 164-170. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_164



Original article

## LINEARIZED FORMS OF ELASTIC WAVE PROPAGATION EQUATIONS

© The Author(s) 2023

**SOKOLOVA Marina Yurievna**

Doctor of Physical And Mathematical Sciences, Associate  
Professor  
*Tula State University*  
(Russia, Tula, e-mail: [m.u.sokolova@gmail.com](mailto:m.u.sokolova@gmail.com))

**KHRISTICH Dmitrii Viktorovich**

Doctor of Physical And Mathematical Sciences, Associate  
Professor  
*Tula State University*  
(Russia, Tula, e-mail: [dmitrykhristich@rambler.ru](mailto:dmitrykhristich@rambler.ru))

**Abstract.** The propagation of acoustic waves in nonlinear elastic media with finite preliminary deformations is considered. The media in the initial state are homogeneous with an elastic potential of a polynomial form, in which the first two nonzero terms of expansion in a series by degrees of the strain tensor are preserved. Depending on the specific structure of the elasticity tensors standing in the potential, the relations can be used for both isotropic and anisotropic media with different types of symmetry in elastic properties. Dynamic equations of propagation of small displacement perturbations are obtained, which are specified for the case of a plane monochromatic wave. Several variants of linearization of dynamic equations are considered. In the first variant, it is assumed that the preliminary deformations are small, and the preliminary rotations are also small or absent. The second variant of the linearization of the elastic wave propagation problem is constructed on the assumption that, under the assumptions of the previous variant, constitutive equations establish a quadratic relationship between the Cauchy stress tensor and the linear strain tensor. In the third variant, it is assumed that the preliminary deformations are finite, the wave propagates in the actual configuration but the relationship between stresses and strains is tensor-linear. Calculations of the phase velocities of wave propagation in a pre-compressed polyamide rod are carried out. The calculation results showed good agreement with the data from known experiments.

**Keywords:** acoustic waves; finite deformations; phase velocities of wave propagation; elastic constants of the second and third orders; mechanics of deformable bodies

**For citation:** Sokolova M.Yu., Khristich D.V. Linearized forms of elastic wave propagation equations // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 164-170. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_164

### 1. Введение

Вопросы распространения упругих (акустических) волн в деформируемых твердых телах на протяжении более чем полувека вызывают интерес исследователей, что подтверждается большим числом публикаций по этой теме в отечественных и зарубежных изданиях. Это связано с широким спектром применения волновых процессов как в сугубо теоретических исследованиях, так и в технике [1], горном деле и сейсмологии [2], медицине [3]. В теории упругости изотропных и анизотропных тел скорости распространения акустических волн связывают с упругими константами материала, что лежит в основе динамических методов определения этих констант [4-5]. Решение задач о распространении акустических волн позволяет идентифицировать свойства неоднородных материалов и многослойных композитов [6-7]. В работах [4-5] установлено, что фазовые скорости распространения упругих волн

зависят от уровня напряжений, созданных в материале в начальном состоянии. Этот факт лежит в основе определения констант упругости третьего порядка [8].

В рамках нелинейной теории упругости динамические уравнения распространения акустических волн в телах с предварительными напряжениями и конечными деформациями получены в работах [9-10; 12-17]. В работах [13; 15; 17] распространение акустических волн рассматривается как процесс наложения малых возмущений поля перемещений на предварительные конечные деформации.

На основе подходов, предложенных в работах [12-13], в данной статье получена эйлерова форма динамических уравнений для малых возмущений перемещений в нелинейном гиперупругом материале с упругим потенциалом полиномиального вида. Уравнение записано в инвариантной форме, что допускает использовать его как для изотропных, так



и для анизотропных материалов. Для предложенного варианта динамических уравнений получены уравнения распространения плоских монохроматических волн и представление акустического тензора.

В работах [12; 14; 16] наряду с общим подходом, учитывающим конечность предварительных деформаций и нелинейный характер связи между напряжениями и деформациями, рассматриваются различные приближенные соотношения. В работе [12] рассматриваются два варианта уравнений при малых начальных деформациях. В первом варианте не учитываются изменения линейных размеров, площадей и объемов при деформировании, а тензоры напряжений Коши и Пиолы-Кирхгофа полагаются равными. Во втором варианте принимается, что для определения деформированного состояния можно применить геометрически линейную теорию, то есть в качестве тензора предварительных деформаций использовать линейный. В работе [16] рассматриваются два варианта приближенных соотношений: в первом учитывается физическая нелинейность материала при бесконечно малых предварительных деформациях, а во втором предварительные деформации полагаются конечными, а связь между напряжениями и деформациями считается линейной. В работе [14] получены уравнения распространения малых возмущений в предварительно напряженной изотропной среде с квадратичным упругим потенциалом.

В данной статье приведены различные формы линеаризации динамических уравнений, в которых используются как предположения о малости предварительных деформаций [12; 16], так и о тензорно-линейной связи между предварительными напряжениями и деформациями [14; 16]. Для полученных вариантов уравнений проведены расчеты фазовых скоростей распространения плоских волн в предварительно сжатом призматическом стержне из материала с известными значениями упругих констант. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, опубликованными в работе [11].

## 2. Уравнения распространения акустических волн в инвариантной форм

Предположим, что в начальный момент времени  $t_0$  в среде отсутствуют деформации и напряжения, а к моменту времени  $t_1$  создано однородное напряженно-деформированное состояние, которому соответствует поле перемещений  $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t_1)$ , конечные деформации  $\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}(t_1)$  и напряжения  $\mathbf{S}_1 = \mathbf{S}(t_1)$ . Аффинор деформаций  $\boldsymbol{\Phi}_1 = \boldsymbol{\Phi}(t_1)$ , мера деформаций Коши-Грина  $\mathbf{G}_1 = \mathbf{G}(t_1)$  и тензор деформаций  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$  связаны с полем перемещений известными соотношениями [18]:

$$\boldsymbol{\Phi}_1 = \mathbf{E} + \nabla^0 \mathbf{u}_1,$$

$$\mathbf{G}_1 = \boldsymbol{\Phi}_1 \cdot \boldsymbol{\Phi}_1^T = \mathbf{E} + \nabla^0 \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_1 \nabla^0 + \nabla^0 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1 \nabla^0, \quad (2.1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \frac{1}{2} (\mathbf{G}_1 - \mathbf{E}) = \frac{1}{2} (\nabla^0 \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_1 \nabla^0 + \nabla^0 \mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1 \nabla^0),$$

где  $\mathbf{E}$  – единичный тензор,  $\nabla^0 = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}$  – оператор начального состояния,  $\mathbf{x}$  – радиус-вектор точки среды в момент времени  $t_0$ , точкой обозначено скалярное произведение.

Нагружение на интервале  $[t_0, t_1]$  полагается квазистатическим, а напряжения  $\mathbf{S}_1$  – уравновешенными, так что

$$\nabla \cdot \mathbf{S}_1 \equiv \mathbf{0}, \quad \ddot{\mathbf{u}}_1 \equiv \mathbf{0}. \quad (2.2)$$

Рассмотрим материал с упругим потенциалом полиномиального вида [9-10; 15-16]. Будем считать, что для рассматриваемого нелинейно упругого материала удельная потенциальная энергия деформаций (упругий потенциал) задана в виде ряда по степеням тензора деформаций Коши-Грина  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , в котором сохранены только первые два ненулевых члена

$$\frac{1}{\rho_0} W = \frac{1}{2} \mathbf{N} \cdots \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{1}{6} \mathbf{L} \cdots \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2.3)$$

где  $\mathbf{N}$  и  $\mathbf{L}$  – симметричные по парам индексов тензоры упругости четвертого и шестого рангов [18], содержащие константы упругости второго и третьего порядков соответственно,  $\rho_0$  – начальная плотность материала.

Известно [13; 18], что энергетически сопряженным тензору деформаций Коши-Грина является второй тензор Пиолы-Кирхгофа  $\mathbf{T}$  (энергетический тензор), который связан с тензором истинных напряжений Коши  $\mathbf{S}$  выражением

$$\mathbf{T} = J \boldsymbol{\Phi}^{-T} \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\Phi}^{-1}, \quad \text{где } J = \frac{dV}{dV_0} = \frac{\rho_0}{\rho} - \text{относительное}$$

изменение объема. Исходя из соотношений (2.3), связь между тензорами деформаций и напряжений в рассматриваемом гиперупругом материале имеет вид

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial W}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{N} \cdots \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon} \cdots \mathbf{L} \cdots \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (2.4)$$

В соответствии с соотношениями (2.1), (2.4) может быть установлена связь между деформациями  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$  и напряжениями  $\mathbf{S}_1$ .

В момент времени  $t_1$  в рассматриваемой среде возбуждается звуковая волна с полем перемещений  $\mathbf{u}_2(\mathbf{x}_1, \tau)$ ,  $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x} + \mathbf{u}_1$ ,  $\tau = t - t_1$ . Если процесс распространения акустических волн в предварительно деформированной среде рассматривать как процесс слабых возмущений, накладываемых на конечные деформации, необходимо считать, что вызываемые волной перемещения  $\mathbf{u}_2$  и их градиенты малы, а также, что в



любой момент времени  $t > t_1$  перемещения точек среды могут быть определены в виде суммы

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}_1, t) = \mathbf{u}_1(\mathbf{x}_1, t_1) + \mathbf{u}_2(\mathbf{x}_1, t) \quad \forall t > t_1. \quad (2.5)$$

В соответствии с соотношениями (2.1) аффинов деформаций в момент времени  $t > t_1$  определяется выражением

$$\Phi = \mathbf{E} + \nabla^0 \mathbf{u} = \mathbf{E} + \nabla^0 \mathbf{u}_1 + \nabla^0 \mathbf{u}_2.$$

Учитывая, что перемещения  $\mathbf{u}_2$  определены в конфигурации  $t = t_1$ , а также связь между набла-операторами начального  $\nabla^0$  и деформированного  $\nabla = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_1}$  состояний [13; 18], получим представление для аффинора деформаций в виде:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_2 = \Phi_1 \cdot (\mathbf{E} + \nabla \mathbf{u}_2). \quad (2.6)$$

В виду предположения о малости перемещений  $\mathbf{u}_2$  и градиентов  $\nabla \mathbf{u}_2$  во всех дальнейших преобразованиях слагаемыми, содержащими  $\nabla \mathbf{u}_2$  во второй и более высоких степенях, будем пренебрегать. Тогда на основании (2.6) получим выражение для тензора деформаций Коши–Грина в момент  $t > t_1$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2, \quad (2.7)$$

$$\text{где } \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2} \Phi_1 \cdot (\nabla \mathbf{u}_2 + \mathbf{u}_2 \nabla) \cdot \Phi_1^T.$$

Используя определяющие соотношения (2.4) и выражение для деформаций (2.7), получим энергетический тензор напряжений в момент времени  $t > t_1$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_2, \quad (2.8)$$

где  $\mathbf{T}_1 = \mathbf{N} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \cdot \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_1$  – напряжения в момент времени  $t = t_1$ ,  $\mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) = \mathbf{N} + \boldsymbol{\varepsilon}_1 \cdot \mathbf{L}$  – обобщенный тензор жесткости материала.

В уравнениях движения в эйлеровой форме, записанных для момента времени  $t > t_1$ ,

$$\nabla \cdot \mathbf{S} = \rho_1 \ddot{\mathbf{u}} \quad (2.9)$$

тензор истинных напряжений Коши  $\mathbf{S} = \mathbf{J}^{-1} \Phi^T \cdot \mathbf{T} \cdot \Phi$  с учетом соотношений (2.8) после преобразований представляется в виде

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{J}_1^{-1} \Phi_1^T \cdot (\mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_2) \cdot \Phi_1 + \mathbf{S}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_2 + \mathbf{u}_2 \nabla \cdot \mathbf{S}_1, \quad (2.10)$$

где  $\mathbf{S}_1 = \mathbf{J}_1^{-1} \Phi_1^T \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \Phi_1$  – однородное поле напряжений в момент  $t = t_1$ , для которого выполняются условия (2.2).

Подставим выражение для напряжений (2.10) в уравнения (2.9) и проведем преобразования с учетом условий (2.2) и (2.5). В силу внутренней симметрии тензора обобщенной жесткости и однородности поля деформаций  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$  дивергенция произведения

$\mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_2$  преобразуется к виду  $\nabla \cdot (\mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_2) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_2 \cdot \mathbf{C}) = \nabla \boldsymbol{\varepsilon}_2 \cdot \mathbf{C}$ . В результате получим уравнения движения в виде:

$$\mathbf{J}_1^{-1} \Phi_1 \cdot (\nabla \boldsymbol{\varepsilon}_2 \cdot \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1)) \cdot \Phi_1 + \mathbf{S}_1 \cdot \nabla \nabla \mathbf{u}_2 = \rho_1 \ddot{\mathbf{u}}_2. \quad (2.11)$$

Уравнения (2.11) описывают распространение малых возмущений перемещений  $\mathbf{u}_2$  в среде с конечными деформациями  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ . Упругие свойства среды задаются обобщенным тензором жесткости  $\mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) = \left. \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \right|_{\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_1}$ . Если в выражении для упругого потенциала (2.3) тензоры  $\mathbf{N}$  и  $\mathbf{L}$  инвариантны относительно любого ортогонального преобразования системы координат [18], то уравнения (2.11) описывают распространение малых возмущений перемещений в изотропном материале, потенциал которого является потенциалом Мурнагана [13].

### 3. Уравнения распространения плоских монохроматических волн

Рассмотрим в среде с предварительными деформациями  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$  распространение плоской монохроматической волны, для которой поле перемещений имеет вид

$$\mathbf{u}_2(\mathbf{x}_1, t) = A \exp(i(\mathbf{k} \mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_1 + \omega t)), \quad (3.1)$$

где  $A$  – амплитуда,  $\mathbf{p}$  – вектор поляризации единичной длины,  $\mathbf{k}$  – волновое число,  $\omega$  – частота,  $\mathbf{n}$  – единичный вектор волновой нормали.

Для поля перемещений (3.1) тензор деформаций

$$\boldsymbol{\varepsilon}_2 = \frac{1}{2} i \mathbf{k} \Phi_1 \cdot (\mathbf{n} \mathbf{u}_2 + \mathbf{u}_2 \mathbf{n}) \cdot \Phi_1^T$$

первое слагаемое из уравнений (2.11) преобразуется к виду

$$\Phi_1 \cdot (\nabla \boldsymbol{\varepsilon}_2 \cdot \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1)) \cdot \Phi_1 = -k^2 \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{M}(\mathbf{n}, \boldsymbol{\varepsilon}_1) \cdot \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{u}_2,$$

где  $\mathbf{F}_1 = \Phi_1^T \cdot \Phi_1$  – мера конечных деформаций

Фингера [13, 18],

$$\mathbf{M}(\mathbf{n}, \boldsymbol{\varepsilon}_1) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon}_1) \cdot \mathbf{n} \text{ – обобщенный тензор}$$

Кристоффеля, определяемый как свойствами материала, так и направлением распространения волны.

Вычисляя входящие в (2.11) производные перемещений (3.1), можно записать уравнения распространения плоской монохроматической волны в виде

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{p} = \rho_0 c^2 \mathbf{p}, \quad (3.2)$$

где  $\mathbf{A} = \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{M}(\mathbf{n}, \boldsymbol{\varepsilon}_1) \cdot \mathbf{F}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_1 \cdot \mathbf{n} \mathbf{n} \mathbf{E}$  –

акустический тензор среды [13] с предварительными деформациями  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ ;  $\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{J}_1 \mathbf{S}_1$  – обобщенный тензор





истинных напряжений [18];  $c = \frac{\omega}{k}$  – фазовая скорость распространения волны.

Из уравнений (3.2) следует, что значение  $\rho_0 c^2$  является собственным значением акустического тензора  $A(n, \epsilon_1)$ , а вектор поляризации – его собственным вектором. Полученное выражение для акустического тензора показывает, что акустический тензор всегда симметричен, а векторы поляризации продольной и поперечных волн ортогональны.

## 4. Линеаризация динамических уравнений

Рассмотрим различные варианты линеаризации динамических уравнений (2.11) и (3.2). В первом варианте предполагаем, что предварительные деформации  $\epsilon_1$  являются малыми, предварительные вращения также малы или отсутствуют, поэтому актуальная конфигурация материала в момент времени  $t_1$  не отличается от начальной конфигурации в момент времени  $t_0$ . В этом случае можно приближенно считать, что тензоры  $\Phi_1$  и  $F_1$  совпадают с единичными, набла-операторы начального и деформированного состояний равны, тензоры напряжений  $S_1 \approx T_1 \approx \Sigma_1$ . При таких предположениях уравнения (2.11) и (3.2) принимают вид:

$$\begin{aligned} \nabla^0 \epsilon_2 \cdots C(\epsilon_1) + S_1 \cdot \nabla^0 \nabla^0 u_2 &= \rho_0 \ddot{u}_2, \\ [M(n, \epsilon_1) + S_1 \cdot nnE] \cdot p &= \rho_0 c^2 p. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Второй вариант линеаризации задачи о распространении упругих волн построим в предположении, что при допущениях предыдущего варианта определяющие соотношения устанавливают связь между тензором напряжений Коши и линейным тензором деформаций и имеют вид:

$$S = N \cdot \epsilon + \frac{1}{2} \epsilon \cdot L \cdot \epsilon.$$

Это представление для тензора напряжений Коши непосредственно подставляется в уравнения движения (2.9), что приводит к существенному упрощению динамических уравнений:

$$\nabla^0 \epsilon_2 \cdots C(\epsilon_1) = \rho_0 \ddot{u}_2, \quad (4.2)$$

$$[M(n, \epsilon_1)] \cdot p = \rho_0 c^2 p. \quad (4.3)$$

Таким образом, в этом случае акустический тензор совпадает с обобщенным тензором Кристоффеля  $A = M(n, \epsilon_1)$  и при использовании нелинейной связи между напряжениями и деформациями зависит не только от свойств материала и вектора волновой нормали, но и от предварительных деформаций  $\epsilon_1$ .

При построении следующего варианта динамических уравнений будем исходить из предположения, принятого в [14], что предварительные деформации являются конечными, волна распространяется в актуальной конфигурации, но связь между напряжениями и деформациями

является тензорно линейной вида  $T = N \cdot \epsilon$ , что соответствует квадратичному представлению для упругого потенциала (2.3). При этом предположении обобщенный тензор жесткости  $C(\epsilon_1) = \left. \frac{\partial T}{\partial \epsilon} \right|_{\epsilon = \epsilon_1} = N$  является постоянным.

Обобщенный тензор Кристоффеля также не зависит от предварительных деформаций:  $M(n) = n \cdot N \cdot n$ .

Уравнения (2.11) и (3.2) принимают вид:

$$J_1^{-1} \Phi_1 \cdot (\nabla \epsilon_2 \cdots N) \cdot \Phi_1 + S_1 \cdot \nabla \nabla u_2 = \rho_1 \ddot{u}_2, \quad (4.4)$$

$$[F_1 \cdot (n \cdot N \cdot n) \cdot F_1 + S_1 \cdot nnE] \cdot p = \rho_0 c^2 p. \quad (4.5)$$

Акустический тензор определяется выражением  $A = F_1 \cdot (n \cdot N \cdot n) \cdot F_1 + S_1 \cdot nnE$ .

Уравнения распространения акустических волн в линейно упругой среде без предварительных деформаций легко получить из уравнений (4.2) и (4.3), положив в них обобщенный тензор жесткости  $C(\epsilon_1) \equiv N$ . В этом случае получим

$$\nabla^0 \epsilon_2 \cdots N = \rho_0 \ddot{u}_2, \quad (n \cdot N \cdot n) \cdot p = \rho_0 c^2 p \quad (4.6)$$

Известно, что уравнения (4.6) позволяют определить фазовые скорости распространения упругих волн как в изотропных, так и в анизотропных материалах.

## 5. Сравнительный анализ определения фазовых скоростей по различным вариантам соотношений

В работе [11] приведены результаты экспериментального исследования зависимости фазовых скоростей распространения упругих волн от предварительных деформаций сжимаемого призматического образца из полиамида. Упругие константы второго и третьего порядков для исследуемого материала приведены в статье [11].

В экспериментах [11] при различных значениях сжимающих напряжений  $S$  (осевых деформаций  $\epsilon$ )

были измерены фазовые скорости пяти волн: в направлении вектора  $n = e_1$  (вдоль оси образца)

измерялись скорости распространения продольной  $c_{11}$  и поперечной  $c_{12} = c_{13}$  волн, в направлении вектора  $n = e_2$  (в поперечном сечении образца)

измерялись скорости распространения продольной  $c_{22}$  и двух поперечных волн  $c_{21}$  и  $c_{23}$ . Результаты измерений приведены в работе [11] в виде графиков зависимостей  $\Delta c_{ij}(\epsilon)$ , где под  $\Delta c_{ij}$  понимается

разность между значением фазовой скорости волны, измеренной в сжатом стержне, и значением скорости распространения волны в недеформированном материале. Для исследуемого материала при отсутствии предварительных деформаций скорость распространения продольной волны составила  $c_l = 2645$  м/с, поперечной волны  $c_s = 1129$  м/с. При деформациях  $\epsilon = -0,004$  измеренные фазовые скорости составили:  $c_{11} = 2657,8$  м/с,  $c_{12} = 1120,9$



м/с,  $c_{22} = 2637,8$  м/с,  $c_{21} = 1138,2$  м/с,  $c_{23} = 1134,8$  м/с.

Были проведены расчеты фазовых скоростей  $c_{ij}$  по соотношениям (3.2), а также с помощью различных вариантов линеаризованных соотношений (4.1), (4.3) и (4.5). Результаты расчетов показали, что с наибольшей точностью вычисляются фазовые скорости продольных волн  $c_{11}$  и  $c_{22}$ .

Отклонение результатов расчетов этих скоростей по соотношениям (3.2) от данных экспериментов не превышают 0,22%, а при расчетах по линеаризованным соотношениям (4.1) и (4.3) 0,82%. При вычислении скоростей распространения поперечных волн  $c_{12}$ ,  $c_{21}$  и  $c_{23}$  результаты расчетов по соотношениям (3.2) отличаются от данных экспериментов на 0,54-1,6%, а при расчетах по соотношениям (4.1) и (4.3) на 0,28-1,8%. Наименьшая точность определения фазовых скоростей соответствует вычислениям по соотношениям (4.5), в которых используется линейная связь между напряжениями и деформациями. В этом случае отличие результатов расчетов от данных эксперимента для продольных и поперечных волн меняется в диапазоне 0,8-2,5%.

Следует отметить достаточно близкие результаты расчетов по полученным уравнениям и их линеаризованным вариантам, а также хорошее соответствие данным экспериментов. Это объясняется малостью предварительных деформаций образца в эксперименте.

### 6. Заключение

В статье рассмотрена задача о распространении акустических волн в нелинейно упругой, в общем случае анизотропной, среде с предварительными конечными деформациями. Уравнения распространения малых возмущений перемещений в таких средах конкретизированы для случая плоской монохроматической волны. Проведена линеаризация полученных динамических уравнений в предположении, что начальные деформации являются малыми, а повороты отсутствующими. Для предварительно сжатого призматического стержня из полиамида определены скорости распространения продольных и поперечных волн. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, опубликованными в [11].

### Библиографический список

1. Беляев, А. К. Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии / А. К. Беляев, В. А. Полянский, Д. А. Третьяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического

университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 130-151. – DOI 10.15593/perm.mech/2020.4.12. – EDN WPKYIS.

2. Кулиев, Г. Г. Определение модулей упругости третьего порядка для осадочных пород на основе скважинных геофизических данных / Г. Г. Кулиев, Х. Б. Агаев, Г. Г. Гасанова // Физика Земли. – 2016. – № 6. – С. 54-60. – DOI 10.7868/S0002333716050069. – EDN WWCBBV.
3. Zaitsev, V. Y. Nonlinear acoustics in studies of structural features of materials / V. Y. Zaitsev // MRS Bulletin. – 2019. – Vol. 44, No. 5. – P. 350-360. – DOI 10.1557/mrs.2019.109. – EDN IALPGL.
4. Biot M.A. The influence of initial stress on elastic waves // J. Appl. Phys. 1940. Vol. 11. N 8. P. 522-530. doi.org/10.1063/1.1712807
5. Toupin R.A., Bernstein B. Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect // J. Acoust. Soc. Am. 1961. Vol. 33. N 2. P. 216-225. doi.org/10.1121/1.1908623
6. Резонансный метод обнаружения и идентификации расслоений в композитных пластинах ультразвуковыми бегущими волнами / Е. В. Глушков, Н. В. Глушкова, М. В. Голуб, А. А. Еремин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2020. – № 6. – С. 125-133. – DOI 10.31857/S0572329920050074. – EDN MSCFXF.
7. Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser Doppler vibrometry / A. A. Eremin, E. V. Glushkov, N. V. Glushkova, R. Lammering // Composite Structures. – 2015. – Vol. 125. – P. 449-458. – DOI 10.1016/j.compstruct.2015.02.029. – EDN UFLFXZ.
8. Jiang Y., Li G., Qian L.-X., Liang S., Destrade M., Cao Y. Measuring the linear and nonlinear elastic properties of brain tissue with shear waves and inverse analysis // Biomech. Model. Mechanobiol. 2015. Vol. 14. N 5. P. 1119-1128, doi 10.1007/s10237-015-0658-0
9. Destrade M., Ogden R.W. On stress-dependent elastic moduli and wave speeds // J. Appl. Math. 2013. Vol. 78. N 5. doi: 10.1093/imamat/hxs003
10. Yang H., Fu Li-Yun, Fu Bo-Ye, Müller T.M. Acoustoelastic FD simulation of elastic wave propagation in prestressed media // Front. Earth Sci. 2022. Vol. 10. doi: 10.3389/feart.2022.886920
11. Zhu Q., Burtin C., Binetruy C. Acoustoelastic effect in polyamide 6: Linear and nonlinear behaviour //



- Polym. Test. 2014. Vol. 40. P. 178-186. doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.09.007
12. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. В 2 т. - Киев: Наукова Думка, 1986.
  13. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. - М.: Наука. 1980. 512 с.
  14. Динамика деформирования упругой среды с начальными напряжениями / Е. И. Роменский, Е. В. Лысь, В. А. Чеверда, М. И. Эпов // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58, № 5(345). – С. 178-189. – DOI 10.15372/PMTF20170518. – EDN WYRGKA.
  15. Белянкова, Т. И. Модули высших порядков в уравнениях динамики преднапряженного упругого тела / Т. И. Белянкова, В. В. Калинин, Д. Н. Шейдаков // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2019. – № 3. – С. 3-15. – DOI 10.1134/S0572329919030036. – EDN ZKGDNJ.
  16. Pau A., Vestroni F. The role of material and geometric nonlinearities in acoustoelasticity // Wave Motion. 2019. Vol. 86. P. 79-90. doi.org/10.1016/j.wavemoti.2018.12.005
  17. Haupt P., Pao Y.-H., Hutter K. Theory of incremental motion in a body with initial elastoplastic deformation // J. Elasticity. 1992. 28. P. 93-221. doi.org/10.1007/BF00132211
  18. Маркин, А. А. Термомеханика упругопластического деформирования / А. А. Маркин, М. Ю. Соколова. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 320 с. – ISBN 978-5-9221-1409-7. – EDN UGLFQL.

*Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ (шифр FEWG-2023-0002).*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 07.09.2023; одобрена после рецензирования 27.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 07.09.2023; approved after reviewing 27.10.2023; accepted for publication 27.10.2023.



Научная статья

УДК 69.07:531.395

ГРНТИ: 30.19 Механика деформируемого твердого тела; 67 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела; 2.1.9. Строительная механика

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_171

## ГАШЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ БАШЕННОГО ТИПА С ПОМОЩЬЮ РЕАКТИВНОГО ГАСИТЕЛЯ

© Авторы 2023

SPIN: 7553-3901

**ШЕИН Александр Иванович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Механика»

*Пензенский государственный университет архитектуры и  
строительства*

*(Россия, Пенза, e-mail: shein-ai@yandex.ru)*

SPIN: 2928-0296

**ЗАЙЦЕВ Михаил Борисович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика»

*Пензенский государственный университет архитектуры и  
строительства*

*(Россия, Пенза, e-mail: zaisev.mihail2011@yandex.ru)*

**Аннотация.** Исследуется влияние параметров управления реактивным гасителем колебаний на размах сейсмических перемещений конструкции башенного типа. Анализируется чувствительность отклика нестационарно движущейся башни на 1) ограничения по перемещению; 2) скорость выбрасываемой реактивной струи; 3) время разового реактивного воздействия. Показан алгоритм определения оптимальных параметров управления реактивными воздействиями. Оценивается эффективность использования реактивного гасителя колебаний.

**Ключевые слова:** сейсмическое воздействие; колебательное движение; гашение колебаний; активный гаситель; реактивный гаситель; механика деформируемого твердого тела; строительная механика

**Для цитирования:** Гашение сейсмических колебаний сооружений башенного типа с помощью реактивного гасителя / А.И. Шеин, М.Б. Зайцев // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 171-176. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_171

Original article

## DAMPING OF SEISMIC VIBRATIONS OF TOWER-TYPE STRUCTURES USING A JET EXTINGUISHER

© Authors 2023

**SHEIN Alexander Ivanovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics  
*Penza State University of Architecture and Construction*

*(Penza, Russia, e-mail: shein-ai@yandex.ru)*

**ZAITSSEV Mikhail Borisovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of  
Mechanics

*Penza State University of Architecture and Construction*

*(Russia, Penza, e-mail: zaisev.mihail2011@yandex.ru)*

**Abstract.** The influence of the control parameters of a reactive vibration dampener on the scope of seismic displacements in a tower-type structure is investigated. The sensitivity of the response of a non-stationary moving tower to 1) restrictions

on movement, 2) the velocity of the jet ejected, and 3) the time of a single reactive impact is analyzed. An algorithm for determining the optimal parameters of reactive effects control is shown. The efficiency of using a reactive vibration dampener is evaluated.

**Keywords:** seismic impact; oscillatory motion; vibration damping; active dampener; reactive dampener; solid deformed body mechanics; building mechanics

**For citation:** Damping of seismic vibrations of tower-type structures using a jet extinguisher / A.I. Shein, M.B. Zaitsev // Expert: theory and practice. 2023. № 4 (23). Pp. 171-176. (InRuss.). doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_171

### *Введение*

Объекты энергетической инфраструктуры, такие как градирни, высотные здания, строящиеся в сейсмически активных районах, другие ответственные здания и сооружения нуждаются в специальных мерах защиты. Совершенствование и создание способов защиты зданий и сооружений от обрушения является актуальной задачей их расчета и конструирования. Одним из наиболее эффективных методов борьбы с развитием перемещений механических систем, получивший в последнее время широкое применение в практике строительства, является демпфирование или гашение колебаний.

Гашение колебаний механических систем может быть достигнуто различными способами: с использованием композитных полимерных материалов [1], фрикционных виброгасителей [2], роликовых систем [3], новых технологических решений [4] и др. В настоящее время разработаны и оптимизированы различные виды гасителей колебаний, из которых наиболее распространенными являются Tuned Mass-Damper [5-7], Tuned Mass Column Damper [8-9], используемые в основном для высотных зданий. В публикациях [10-12] рассматривались новые оригинальные способы гашения колебаний различных конструкций и методы расчета, в частности ленточно-тросовая система с гидроцилиндром одностороннего действия. В [13] показана работа жидкостного реактивного гасителя. Основы функционирования гасителя с реактивным воздействием газовой струи приведены в [14]. Принцип действия такой системы состоит в создании знакопеременной реактивной силы, препятствующей относительным (изгибным) перемещениям (колебательным движениям) сооружения в нужные моменты времени.

### *Предмет, задачи и методы*

Исследовался процесс работы реактивного гасителя колебаний конструкции охлаждающей башни (градирни) при сейсмическом воздействии. Форма сооружения представляла собой усеченную правильную пирамиду квадратного сечения, с размерами основания – 9х9 м и верхнего яруса – 6.5х6.5 м. Высота сооружения – 21 м. Конструктивная схема башни – стальной каркас, состоящий из четырех угловых стоек сечением из квадратной трубы  $\square 120 \times 120 \times 3$  мм. Пространственная жесткость каркаса обеспечивалась горизонтальными поясами из 4 стержней сечением  $\square 120 \times 120 \times 3$  мм, установленными с шагом 3 м (7 ярусов) и системой связей между стойками в виде раскосов сечением  $\square 40 \times 40 \times 2$  мм.

Сейсмическое воздействие моделировалось акселерограммой землетрясения, произошедшего в Турции 17 августа 1999 г., которое характеризуется высоким уровнем переносных ускорений. Характеристики этого воздействия представлены на рис. 1 – 2.

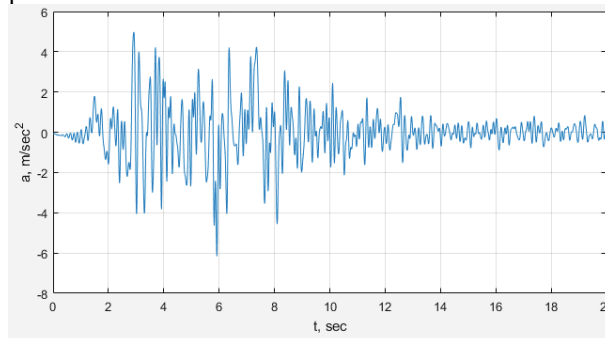


Рис. 1. Акселерограмма землетрясения

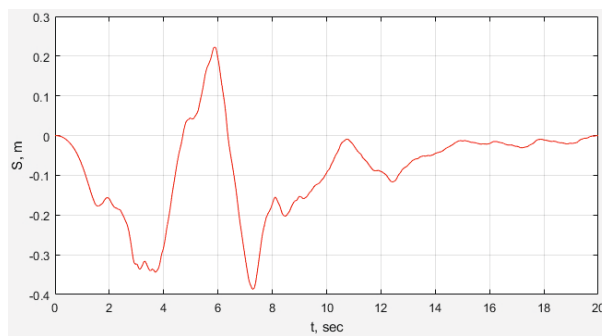


Рис. 2. Сейсмограмма землетрясения

Для выполнения исследования авторами разработано программное средство «Fluctuations» в среде «MatLab», и модуль «Active dampfering», реализующий интегрирование системы дифференциальных уравнений демпфируемого движения стержневой системы в форме МКЭ. Стержневой пространственный КЭ, используемый для расчёта произвольной пространственной стержневой системы, имеет три линейных и три угловых перемещения в узле. В предлагаемой работе ориентация вектора однокомпонентного сейсмического воздействия выбрана вдоль горизонтальной оси  $OY$  глобальной системы координат (рис.3).

Конечно-элементная модель и результаты расчета в виде графиков линейных перемещений вдоль оси  $Y$  ( $U_y$ ) характерных узлов стержневой системы представлены на рис.3 – 4.



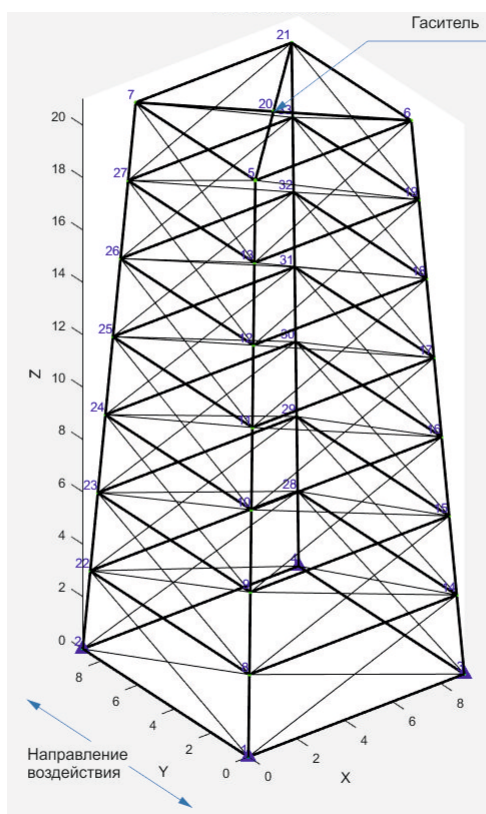


Рис. 3. Конечноэлементная модель стержневой системы

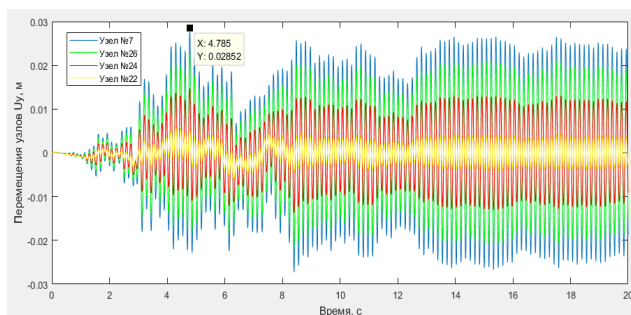


Рис. 4. Перемещения характерных узлов башни при сейсмическом воздействии без гашения колебаний

Будем полагать, что сейсмическое воздействие носит выраженный линейный характер, в связи с чем, снижение размаха колебаний в данный момент времени обеспечивается знакопеременной реактивной силой.

Основным управляющим воздействием будет реактивная сила газовой струи, вырывающейся из сопла гасителя под высоким давлением. При этом реактивная сила от сгорающего топлива определяется известным соотношением:

$$R = V_e \cdot \frac{dm}{dt}, \quad (1)$$

Здесь  $V_e$  – скорость выбрасывания газовой струи,  $\dot{m}$  – скорость расходования массы топлива. В работе рассматривалось два варианта изменения

функции скорости струи – с мгновенным и постепенным достижением максимальных значений.

Для узла сооружения с присоединенным реактивным гасителем уравнение движения МКЭ примет вид:

$$(M_i + m_i)\ddot{u}_i + \sum_{j=1}^n k_{ij}u_j = P_i \mp v_e \cdot \dot{m}_i. \quad (2)$$

где  $m_i$  – переменная масса реактивного гасителя.

При этом матрицы масс и вектор внешних нагрузок имеют вид

$$M = \text{diag}[M_1 \ M_2 \ \dots \ M_i + m_{i,t+\Delta t} \ \dots \ M_n], \quad (3)$$

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_i \mp V_e (m_{i,t+\Delta t} - m_{i,t}) / (\Delta t) \ \dots \ P_n]^T. \quad (4)$$

Возмущающее воздействие создавалось движением опорных узлов согласно сейсмограммы землетрясения (рис. 2).

Основными характеристиками реактивного гасителя, обеспечивающими эффективное гашение колебаний, являются:

- скорость выбрасывания реактивной струи  $V_{gas}$ , м/с;
- время выбрасывания реактивной струи за одно включение  $T_{gas}$ , м/с;
- величина предельно допустимого относительного отклонения точек защищаемой механической системы  $\delta_{max}$ , м.

В предлагаемых исследованиях гаситель располагался в центральном узле верхнего сечения башни – в узле 20. Гаситель – это блок из двух противоположно направленных реактивных батарей. Гаситель включался в работу в том случае, когда контролируемое относительное перемещение какого-либо узла достигало значения  $\delta_{max}$ . Направление реактивной силы гасителя определялось направлением вектора относительной скорости контрольного узла, т.е. противоположно ему.

В работе исследовалось, как влияют основные параметры реактивного гасителя на эффективность гашения колебаний.

#### Результаты исследований и обсуждение

##### 1. Внезапно приложенная нагрузка от реактивного гасителя (рис.5)

Примем скорость истечения газов из сопла гасителя постоянной:

$$V_e = \text{const}, \quad (5)$$

а закон изменения массы горючей жидкости в виде убывающей функции:

$$m = m_0(1 - \beta t). \quad (6)$$

Здесь  $\beta$  – коэффициент размерностью  $\text{с}^{-1}$ .

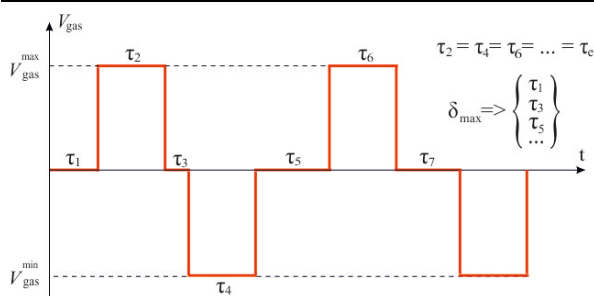


Рис. 5. График изменения скорости реактивной струи

1.1. *Гашение колебаний на участках со всплесками акселерограмм ( $0 \leq t \leq 8$  с).*

При  $V_{gas} = 1500$  м/с,  $T_{gas} = 0.02$  с,  $\delta_{max} = 0.005$  м получены результаты, представленные на рис.6. Оценка эффективности работы гасителя проводилась по кинематическим характеристикам узла башни с наибольшими перемещениями – узла №7.

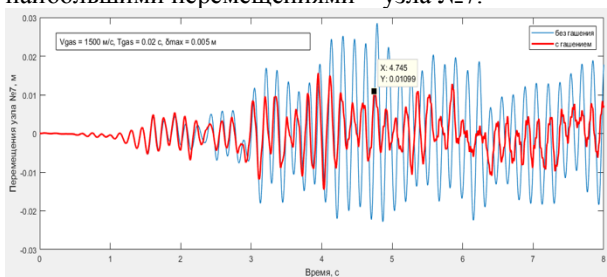


Рис. 6. Перемещение узла №7 при работе гасителя

На рис. 7 – 9 представлены графики изменения максимальных относительных перемещений характерных узлов в зависимости от изменения отдельных параметров гасителя – скорости реактивной струи  $V_{gas}$ , времени действия реактивной струи  $T_{gas}$ , величины предельно допустимого относительного отклонения  $\delta_{max}$ .

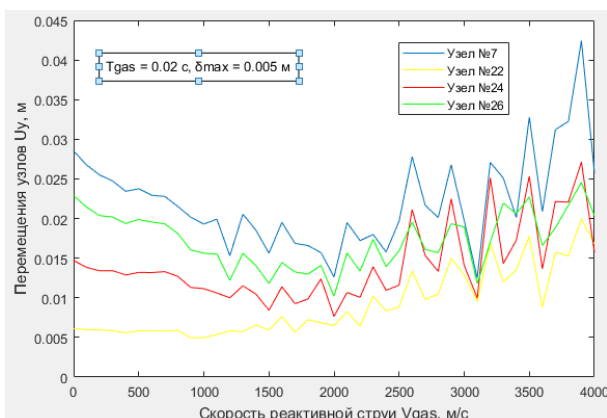


Рис. 7. Зависимость максимальных перемещений характерных узлов от скорости реактивной струи  $V_{gas}$

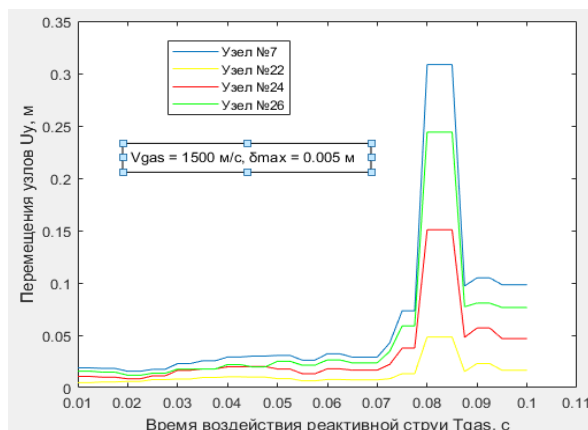


Рис. 8. Зависимость перемещений характерных узлов от времени действия реактивной струи  $T_{gas}$

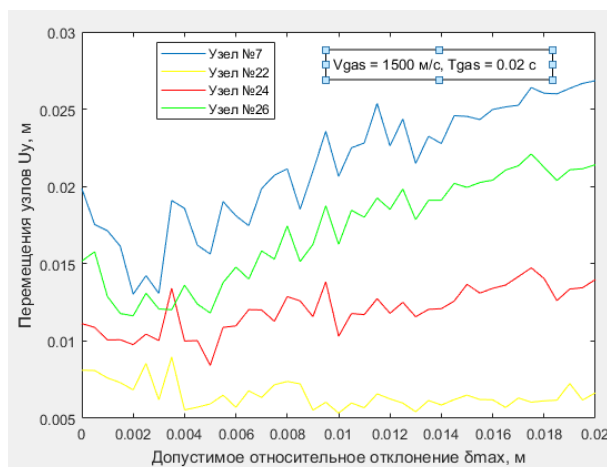


Рис. 9. Зависимость перемещений характерных узлов от величины предельно допустимого относительного отклонения  $\delta_{max}$

1.2. *Борьба с резонансом или биениями ( $8 \leq t \leq 20$  с).*

Частота свободных колебаний (основной тон)  $p = 39.03$  рад/с. Преобладающая частота возмущающего воздействия на участке акселерограммы ( $10 \leq t \leq 20$  с)  $\gamma = 36.07$  рад/с. Т.е. графики движения узлов незащищенной конструкции на указанном временном интервале показывают процесс биений. Установка гасителя с мгновенным приложением реактивной силы позволяет снизить размах колебаний на 50-80%. (рис. 10).

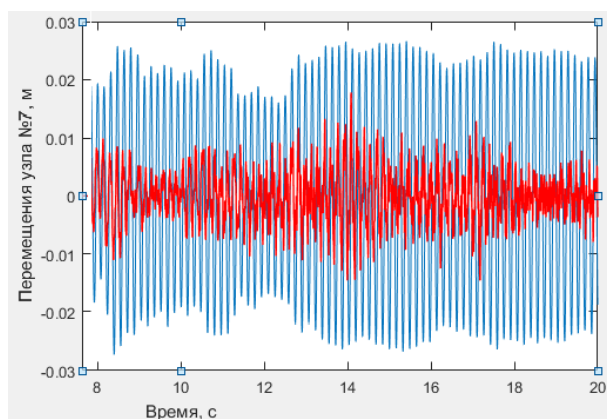




Рис. 10. Гашение колебаний на участке с резонансным воздействием

## 2. Оптимизация параметров гасителя

Построим табличную функцию максимальных перемещений узла №7 от двух переменных (скорость реактивной струи  $V_{gas}$  и время действия струи  $T_{gas}$ ) при помощи разработанного программного средства и, выполнив интерполяцию сплайнами, получим аналитически функцию цели:

$$U_{\max}(V_{gas}, T_{gas}) \rightarrow \min$$

Программное средство позволяет определять локальные минимумы функции нескольких переменных в некоторой окрестности точки области определения (рис. 11).

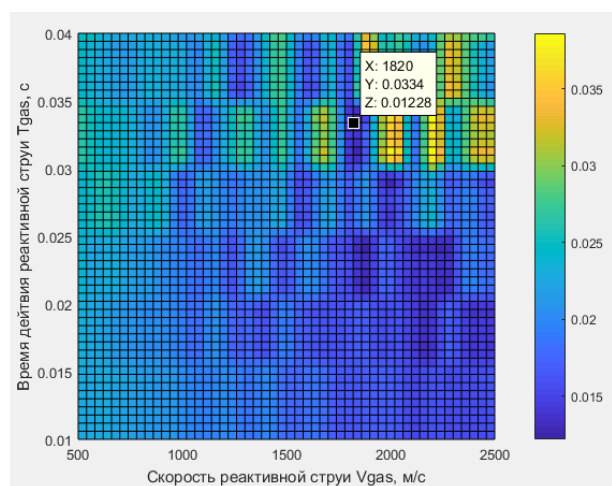


Рис. 11. Мозаика максимальных перемещений с локальными минимумами

Расчет показал, что наиболее оптимальные параметры гасителя для данной задачи  $V_{gas} = 1816.7$  м/с,  $T_{gas} = 0.0335$  с. (рис. 12).

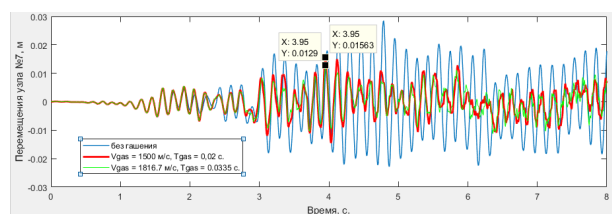


Рис. 12. График перемещений узла №7 при полученных оптимальных параметрах

Таким образом, программа позволяет формировать оптимальный управляющий пакет для реактивного гасителя колебаний при любых сейсмически возмущающих воздействиях на сооружение.

## Выводы

1. Проведена численная проверка работоспособности управляемого реактивного гасителя для сооружений башенного типа.
2. Рассмотрены несколько вариантов управляющих воздействий.
3. Показано, что реактивный гаситель с рационально подобранными параметрами управления позволяет снижать уровень механических колебаний зданий и сооружений на 50-80 %.

## Библиографический список

1. Natalia Lasowicz, Robert Jankowski: Investigation of behaviour of metal structures with polymer dampers under dynamic loads. *Procedia Engineering* 199, 2832-2837 (2017).
2. J. Y. Seong, K. W. Min: An analytical approach for design of a structure equipped with friction dampers. *Procedia Engineering* 14, 1245-1251 (2011).
3. O. A. Burtseva, A. N. Tkachev, S. A. Chipko: Roller seismic impact oscillation neutralization system for high-rise buildings. *Procedia Engineering* 129, 259-265 (2015).
4. Abramyan, S.G., Burlachenko, O.V., Oganessian, O.V., Burlachenko, A.O., Archakov, I.B., Pleshakov, V.V.: Technological Solutions Ensuring Reliable Operation of Steel Vertical Reservoirs in Seismic Areas. *Construction Materials and Products* 5(5), 5-16 (2022). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-5-16>.
5. Giuseppe Carlo Marano, Rita Greco, Francesco Trentadue, Bernardino Chiaia: Constrained reliability-based optimization of linear tuned mass dampers for seismic control. *International Journal of Solids and Structures* 44, 7370-7388 (2007).
6. H. R. Owji, A. Hossain Nezhad Shirazi, H. Hooshmand Sarvestani: A comparison between a new Semi-Active Tuned Mass Damper and an Active Tuned Mass Damper. *Procedia Engineering* 14, 2779-2787 (2011).
7. Sadegh Etedali, Hojjat Rakhshani: Optimum design of tuned mass dampers using multi-objective cuckoo search for buildings under seismic excitations. *Alexandria Engineering Journal* 57, 3205-3218 (2018).
8. Christoph Adam, Alberto Di Matteo, Thomas Furtmüller, Antonina Pirrotta: Earthquake excited base-isolated structures protected by Tuned Liquid Column Dampers: design approach and



- experimental verification. *Procedia Engineering* 199, 1574-1579 (2017).
9. Okyay Altay, Felix Nolte, Sebastian Stemmler, Dirk Abel, Sven Klinkel: Investigations on the performance of a novel Semi-active Tuned Liquid Column Damper. *Procedia Engineering* 199, 1580-1585 (2017).
  10. Shein A., Chumanov A., Malkov A., Laskov N. New vibration dampers for buildings and structures // *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2503. 2022. C. 050065. DOI:10.1063/5.0100292.
  11. Shein A.I., Chumanov A.V. Belt vibration damping system for closed-type domes // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. T. 160. P. 245-252. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1\_33.
  12. Shein A., Chumanov A. Modified method of variable elasticity parameters for solving problems of dynamics of rod systems taking into account physical and geometric nonlinearities // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 5th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, WMCAUS 2020 – Vol. 4. 2020. C. 042066. DOI:10.1088/1757-899X/960/4/042066.
  13. Shein A.I., Shmelev D.A. Evaluation of the effectiveness of an active liquid vibration dampener of high-rise structures under non-stationary impacts // *Construction mechanics and calculation of structures*. 2014. No. 1 (252). pp. 59-63.
  14. Шеин А.И., Зайцев М.Б. Математическое моделирование работы реактивного гасителя колебаний башни градирни [Электронный ресурс] // *Моделирование и механика конструкций*. 2023. №17. Систем требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no17/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/17.01/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no17/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/17.01/at_download/file)

Статья подготовлена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 28.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 28.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.



Научная статья  
УДК 539.3

ГРНТИ: 30.19 Механика деформируемого твердого тела; 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела; 2.1.9. Строительная механика  
DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_177

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СТОЙКИ ИЗ ПОРИСТОГО БЕТОНА, УПРОЧНЕННОГО РАСПЛАВОМ ЖИДКОГО СТЕКЛА, С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ СМЕСЕЙ И ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТИ

© Авторы 2023  
SPIN: 5689-8546

**ШЛЯХОВ Станислав Михайлович**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры  
строительных материалов, конструкций и технологий  
*Саратовский государственный технический университет имени  
Гагарина Ю. А.  
(Россия, Саратов)*

SPIN:3064-7492

**КРИВУЛИНА Эльвира Федоровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов,  
конструкций и технологий  
*Саратовский государственный технический университет имени  
Гагарина Ю. А.  
Россия, Саратов, e-mail: orifelwi@mail.ru)*

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме повышения устойчивости сжатых стоек при использовании технологии насыщения порового пространства бетона – расплавом стекла, которое после отверждения имеет модуль упругости, превышающий модуль упругости исходного пористого материала. Свойства полученного таким образом композита определяются с использованием теории смесей. Распределение расплава стекла по сечению стойки определяется решением задачи диффузии жидкого стекла (расплава) в тело бетона. Решение задачи устойчивости стойки после упрочнения получено с позиций детерминистической и вероятностной постановок. Такое упрочнение стойки позволило существенно повысить ее устойчивость.

**Ключевые слова:** стойка; устойчивость; пористость; вероятность; пористый бетон, строительная механика; механика деформируемого твердого тела

Original article

## ASSESSMENT OF STABILITY OF A RACK MADE OF POROUS CONCRETE, STRENGTHENED WITH MELT LIQUID GLASS FROM THE STANDARD OF THE THEORY OF MIXTURES AND THE THEORY OF PROBABILITY

© The Authors 2023

**SHLYAKHOV Stanislav Mikhailovich**

Doctor of physical and mathematical sciences, Professor of the  
Department of Building Materials, Constructions and Technologies  
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
(Russia, Saratov)*

**KRIVULINA Elvira Fedorovna**

Candidate of Technical sciences, Associate Professor, Department of  
Building Materials, Constructions and Technologies  
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
(Russia, Saratov, e-mail: orifelwi@mail.ru)*

**Abstract.** The article is devoted to solving the problem of increasing the stability of a concrete rack by saturating the pore space with a reinforcing substance – glass with an elastic modulus exceeding the original material. The properties of the composite thus obtained are determined using the theory of mixtures. The distribution of glass filler over the section of the rack is determined by solving the problem of the diffusion of liquid glass into the body of concrete. The solution to the problem of column stability after hardening was obtained from the standpoint of deterministic and probabilistic formulations. The glass strengthening of the rack led to a positive result: an increase in its stability.

**Keywords:** rack; stability; porosity; probability; porous concrete; building mechanics; solid deformed body mechanics

В различных областях промышленности применяют пористые материалы как естественного, так и искусственного происхождения. В строительстве, в первую очередь, это грунт. Проектирование фундаментов на грунтовом упругом основании не может выполняться без учета его пористости. Пористые материалы искусственного происхождения – это керамика, бетон, жаростойкие материалы (графит), а также тугоплавкие металлы (вольфрам, титан, ниобий, тантал). Изделия из этих материалов получают методом прессования или порошковой металлургии. Современными технологиями получают пенобетон, пористое железо и пористый алюминий.

Внедрение пористых материалов в современное производство объясняется их специфическими свойствами, к которым относятся высокая удельная прочность, пониженная теплопроводность, повышенное шумопоглощение, жаростойкость и другие характеристики. Современная наука о прочности опирается на фундаментальный постулат – гипотезу сплошности материала, которому пористые материалы не соответствуют. Для устранения этого несоответствия возможны следующие направления: разработать дискретную механику деформируемых сред, которая в настоящее время пока не достигла прикладного уровня; заменить пористую среду сплошной и разработать алгоритм определения ее механических характеристик, скорректированных с учетом ее пористости на основе экспериментальных данных. Можно отметить работы [1-4], в которых рассматривается эта проблема.

Помимо положительных свойств пористые материалы по сравнению со сплошными имеют и отрицательные стороны. Так наличие пористости снижает прочностные и жесткостные параметры материала. Одним из способов снижения этого недостатка является заполнение пор упрочняющим веществом – расплавом. Например, пористый бетон упрочняется расплавами серы, полимерных материалов, жидким стеклом, после затвердения которых получаем композит с улучшенными характеристиками по сравнению с исходным пористым материалом. Область приложения технологии насыщения пор в теле конструкции упрочняющим веществом, а также техника ее исполнения достаточно полно отражены в [5].

В настоящей статье рассмотрена проблема определения устойчивости упрочненной стеклом бетонной стойки. Из теории устойчивости прямых стержней следует, что критическая сила пропорциональна модулю упругости материала стержня. Бетон является пористым материалом,

модуль упругости которого зависит от величины пористости, которая снижает жесткость стержня. Естественно предположить, что критическую силу можно повысить, заполняя поры упрочняющим веществом с модулем упругости большим, чем у бетона.

В качестве примера рассмотрим стойку круглого поперечного сечения, выполненную из тяжелого бетона с пористостью  $P = 0,08$  и модулем упругости  $E_b = 0,2 \cdot 10^5$  МПа [5]. В качестве заполнителя пор рассмотрим жидкое стекло (расплав), которое после остывания обретет модуль упругости  $E_{ст} = 0,56 \cdot 10^5$  МПа [2]. Модуль упругости для полученного композита согласно теории смесей [7] определится формулой

$$E_{см} = E_{ст}u_{ст} + E_b v_b, \quad (1)$$

где  $E_{ст}$  – модуль упругости стекла,  $u_{ст}$  – объемная доля (концентрация) стекла,  $E_b$  – модуль упругости бетона,  $v_b$  – объемная доля бетона, причём  $u_{ст} + v_b = 1$ .

Закон распределения стекла по сечению стойки получаем из решения уравнения диффузии [8]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2)$$

при выполнении граничных и начальных условий (рис. 1)

$$t = 0 \quad C = 0 \quad \text{при } 0 \leq r \leq R_0$$

$$t > 0 \quad C = C_{п} \quad \text{при } r = R_0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0.$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $C$  – концентрация диффундирующего вещества,  $C_{п}$  – поверхностная концентрация диффундирующего вещества, равная пористости бетона на поверхности.

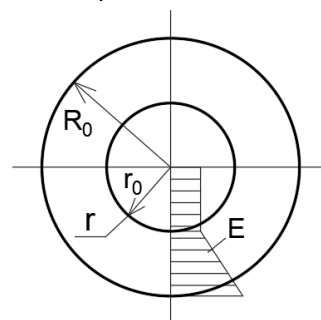


Рис. 1. Схема распределения модуля упругости по сечению

Процесс диффузионного насыщения стойки стеклом является изотермическим процессом и при постоянной пористости описывается функцией, близкой к линейной. Для дальнейшего примем закон насыщения бетона жидким стеклом в виде следующей функции



179



$$Q_{кр} = \frac{\pi^2 B}{4l^2}. \quad (14)$$

Для конкретного случая расчета примем следующие исходные данные:

1. Диаметр стойки  $d = 20$  см.
2. Материал стойки: тяжелый бетон.
3. Пористость бетона  $P = 0,08$ .
4. Зона насыщения бетона расплавом стекла соответствует  $\lambda = 0,75$ .
5. Модуль упругости бетона  $E_6 = 0,2 \cdot 10^5$  МПа.
6. Модуль упругости стекла  $E_{ст} = 0,56 \cdot 10^5$  МПа.
7. Высота стойки  $l = 3$  м.
8. Математическое ожидание продольной силы  $m_Q = 300$  кН.
9. Среднее квадратическое отклонение нагрузки  $\sigma_Q = 20$  кН.
10. Параметры случайного процесса:  $T = 10$  лет =  $315 \cdot 10^6$  с – срок службы стойки,  $\alpha = 0,3 \frac{1}{с}$ ,  $\beta = 0,4 \frac{1}{с}$ . Нормативная надежность  $H_{норм} = 0,999$ .

Рассмотрим стойку без упрочнения. Определяем параметр  $B$

$$B = E_6 \frac{\pi R^4}{4} = 20 \cdot 10^3 \frac{\pi R^4}{4} = 1,57 \text{ МН} \cdot \text{м}^2.$$

Определяем критическую силу  $Q_{кр} = \frac{\pi^2 B}{4l^2} = 430$  кН.

Рассмотрим стойку с равномерным насыщением стеклом по всему сечению. Модуль упругости композита равен  $E_{см} = E_{ст} u_{ст} + E_6 v_6 = 22,9 \cdot 10^3$  МПа.

Упруго-геометрический параметр жесткости  $B_{см}$  равен

$$B_{см} = E_{см} \frac{\pi R^4}{4} = 22,9 \cdot 10^3 \frac{\pi R^4}{4} = 1,798 \text{ МН} \cdot \text{м}^2.$$

Определяем критическую силу для композита  $Q_{кр см} = \frac{\pi^2 B_{см}}{4l^2} = 492,3$  кН.

Определяем критическую силу для неполного насыщения сечения стеклом. Вычислим упруго-геометрический параметр жесткости  $B_n$  по формуле (11)

$$B_n = \pi \left( E_6 \int_0^{r_0} r^3 dr + \int_{r_0}^R E_{см} r^3 dr \right) = \pi \left( \frac{E_6 r^4}{4} \Big|_0^{r_0} + 10^3 \left( \frac{11,6}{R_0} \cdot \frac{r^5}{5} + \frac{11,3 r^4}{4} \right) \Big|_{r_0}^R \right).$$

Выполняя вычисления, получаем  $B_n = 1,658 \text{ МН} \cdot \text{м}^2$ .

Критическая сила при неполном упрочнении стеклом равна

$$Q_{кр н} = \frac{\pi^2 B_n}{4l^2} = 454 \text{ кН}.$$

#### Результаты

1. Критическая сила стойки без упрочнения  $Q_{кр} = 430$  кН.

Детерминистический коэффициент запаса устойчивости  $n_y = \frac{Q_{кр}}{Q} = 1,43$ .

2. Критическая сила стойки при частичном упрочнении  $Q_{кр н} = 454$  кН.

Коэффициент запаса устойчивости  $n_y = \frac{Q_{кр н}}{Q} = 1,513$ .

4. Критическая сила при полном насыщении бетона стеклом  $Q_{кр см} = 492,3$  кН.

Коэффициент запаса устойчивости  $n_y = \frac{Q_{кр см}}{Q} = 1,64$ .

#### Обсуждение

Рассмотрим задачу устойчивости с вероятностных позиций.

Считаем, что нагрузка  $Q$  представляет собой нормальный стационарный случайный процесс. В этом случае надежность  $H$  определяется формулой [10]

$$H = \exp \left\{ - \frac{T \sigma_Q}{2 \pi \sigma_Q} \exp \left( - \frac{(Q_{кр} - m_Q)^2}{2 \sigma_Q^2} \right) \right\}. \quad (15)$$

Экспериментально получено [10], что корреляционная функция имеет вид

$$K_Q(\tau) = \sigma_Q^2 e^{-\alpha|\tau|} \left[ \cos \beta \tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta |\tau| \right], \quad (16)$$

где  $\alpha, \beta$  – эмпирические коэффициенты.

На основании (16) и (15) получим [6]

$$H = \exp \left\{ - \frac{T \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2 \pi} \exp \left( - \frac{(Q_{кр} - m_Q)^2}{2 \sigma_Q^2} \right) \right\}. \quad (17)$$

Из решения задачи устойчивости определяем значение критической силы  $Q_{кр}$  по формуле (17) вычисляем искомую надежность. Условием гарантии безопасности эксплуатации стойки будет неравенство  $H \geq H_{норм}$ . Здесь  $H_{норм}$  – заданная нормативная надежность.

Рассмотрим стойку без упрочнения. Критическая сила для данной стойки равна  $Q_{кр} = 430$  кН. Определяем надежность стойки

$$H = 0,98336 < H_{норм} = 0,999.$$

Как видим, расчетная надежность меньше нормативной.

Рассмотрим стойку с полным насыщением стеклом. Имеем критическую силу  $Q_{кр} = 492,3$  кН.

Надежность стойки равна  $H = 1$ .

Полученная надежность удовлетворяет нормативным требованиям.

Рассмотрим частичное насыщение стеклом ( $r_0 = 0,75R$ ). Получаем  $Q_{кр} = 454$  кН. Надежность стойки

$$H = \exp \left\{ - \frac{315 \cdot 10^6 \sqrt{0,3^2 + 0,4^2}}{2 \cdot 3,14} \exp \left( - \frac{(454 - 300)^2}{2 \cdot 20^2} \right) \right\} = 0,99999$$

Получаем, что в данном случае нормативная надежность обеспечена и при неполном насыщении стойки стеклом, что экономически выгоднее полного насыщения.

#### Выводы

Как следует из проведенных исследований, упрочнение бетона расплавом стекла приводит к повышению устойчивости стойки как с детерминистических, так и с вероятностных позиций. Закрытие поверхностных пор стеклом затруднит проникновение влаги и агрессивных сред



в тело изделия из пористого материала. Это повысит его эксплуатационную долговечность.

**Библиографический список**

1. Кингери У. Д. Введение в керамику. - М.: Стройиздат, 1967, 500 с.
2. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. - М. Мир, 1982, 334 с.
3. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении. - М. Машиностроение, 1981, 248 с.
4. Кашталян Ю. А. Характеристики упругости материалов при высоких температурах. - Киев. Наукова думка, 1970, 112 с.
5. Строительство, специальные цементы. URL: [www.stfa.ru/poristost-betona/1](http://www.stfa.ru/poristost-betona/1)
6. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. - М.: Физматгиз, 1959, 856 с.
7. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. - М. Наука, 1977, 400 с.
8. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М. Наука, 1964, 488 с.
9. Расчеты на прочность в машиностроении / Ред. С. Д. Пономарева. Т.3, 1959, 1118 с.
10. Арасланов А. М. Расчет элементов конструкций заданной надежности при случайных воздействиях. - М. Машиностроение, 1987, 128 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 27.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 27.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.



Научная статья

УДК 339.166.2 : 665.725

DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_182

### ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ОСНОВЕ СМЕШАННЫХ ХЛАДОГЕНТОВ В РОССИИ

© Авторы 2023

**АЛПАТОВ Денис Алексеевич**

ведущий инженер-проектировщик КИПиА и СС  
ООО «Газпром Линде Инжиниринг» (Россия, СПб)

SPIN: 9496-4605

ORCID: 0000-0003-2556-0824

**МЕЛЬНИКОВА Дарья Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры "Автоматизация  
и управление технологическими процессами", заместитель  
директора Института автоматизации и информационных  
технологий

Самарский государственный технический университет  
(Россия, Самара, e-mail: melnikovada1988@mail.ru)

SPIN: 9373-0609

ORCID: 0000-0002-1966-1250

**ЕРМОЛИНА Лилия Валерьевна**

кандидат экономических наук, доцент, кафедра «Прикладной  
менеджмент»

Самарский государственный экономический университет  
(Россия, Самара, e-mail: ermolina@mail.ru)

**Аннотация.** Данная статья обновляет научное понимание процесса сжижения газа в российской отрасли и задает возможное направление для ее развития. Известно, что, базовые процессы по получению сжиженного природного газа (СПГ) с использованием термодинамических циклов включают следующие этапы: подготовка сырьевого газа, генерация холода, охлаждение газа до точки сжижения при определенном давлении и его последующее переохлаждение. Обычно применяются многократные процессы конденсации, испарения, сжатия, расширения, фазового разделения, смешения и перемещения хладагентов, сырьевого газа и их компонентов и т.д. Для осуществления данных процессов требуется огромная база сложного оборудования, однако, их можно оптимизировать, используя, отрицательные температуры окружающей среды, а также грамотное распределение потока хладагентов.

В статье, помимо отражения текущего положения дел по производству СПГ в России, отмечается значимость выбора оптимальных источников холода, способов его получения и передачи, а также подчеркивается значимость исследований методики получения СПГ на основе смешанных хладагентов. Приводится краткий анализ существующих в стране технологий по данному направлению. Описываются процессы, основанные на каскадных циклах, из чего можно сделать вывод о целесообразности применения их в местах с низкой температурой. Доказывается преимущество использования способов с применением смешанных хладагентов в условиях российского климата на основе практических данных.

**Ключевые слова:** СПГ; термодинамический цикл; сырьевой газ; хладагент; каскадные циклы

**Для цитирования:** Алпатов Д.А., Мельникова Д.А., Ермолина Л.В. Преимущества применения технологий сжижения природного газа на основе смешанных хладагентов в России // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 182-187. doi 10.51608/26867818\_2023\_4\_182



СПГ-аппаратуры с отечественного рынка основная проблема остается в технологии. Все же, российская компания «Новатэк» настойчиво работает над улучшением ситуации, таким образом, разработав уже четыре технологии по сжижению газа (рис. 2).



Рисунок 2. Обзор технологий производства СПГ в России (авторская разработка)

Однако, на практике протестирован только первый способ – на 4-ой линии завода Ямал СПГ. Кроме того, технология «Арктический каскад модифицированный» рассчитана на производство до 3 млн тонн в год, что более свойственно для среднетоннажного производства [2]. «Арктический микс» обещает большие объемы, но технология разработана для реализации проектов на базе оснований гравитационного типа, что делает ее достаточно специфичной, заявленная мощность – более 6 млн тонн СПГ в год [3].

Важно подметить, что компания в августе 2023 года выпустила первую технологическую линию проекта Арктик СПГ – 2 как раз на базе платформы, описанной ранее, при этом технология получения СПГ в общий доступ не попала. По заявлению главы «Новатэка» данная линия должна выйти на проектную мощность, к слову – 6,6 млн тонн в год, в первом квартале 2024 года. Можно предположить, что компания уже внедрила свою последнюю разработку на «плавающий завод» и об успешности или неуспешности предприятия скоро будет известно.

Таким образом, несмотря на постепенное улучшение положения по добыче СПГ, перед страной все еще стоит огромная задача по испытаниям и внедрению российских способов сжижения природного газа на планируемые и строящиеся заводы СПГ. Вместе с тем, за основу должны браться разработки на основе технологий смешанного хладагента, в частности DMR, поскольку именно российский климат позволяет получать максимальную результативность при их использовании.

Наиболее важными факторами, с точки зрения энергетической эффективности при производстве СПГ, являются: виды источника и способы получения холода, а также способы его передачи сырьевому газу. Известно, что наименьшие энергетические потери в процессе сжижения обеспечиваются при осуществлении теплообмена между хладагентом и сырьевым газом, включая охлаждение последнего от исходной окружающей температуры до температуры сжижения, при постепенном изменении температур испарения

хладагентов с минимальными перепадами температур между ними. Однако, такие технологии требуют большого числа криогенных теплообменников и потоков хладагентов [4].

При этом, процесс охлаждения сырьевого газа хладагентом, который уже охлажден до температур сжижения, несет в себе наибольшие энергетические затраты. Такое явление особенно часто встречается при использовании чистых азотных циклов, где температурные перепады достаточно значительны. Однако, технологические установки с оборудованием, использующие данные циклы охлаждения, имеют достаточно простую конструкцию, а затраты на разработку и реализацию такого проекта невелики по сравнению, например, с установками, использующими циклы смешанных хладагентов.

В связи с этим развитие технологий сжижения идет в направлении поиска оптимального компромисса между требованиями высокой экономичности и малых капитальных затрат в зависимости от единичных мощностей, конкретных условий эксплуатации и других факторов.

В зависимости от исходных параметров и состава сырьевого газа, видов и источников используемого холода, рода хладагентов, характеристик используемых процессов и технологического оборудования возможно создание большого многообразия технологических схем сжижения природного газа, которые можно классифицировать по следующим важным признакам:

- видам используемых компрессоров: центробежные, осевые и т.п.;
- видам приводов компрессоров: газотурбинные, паротурбинные, электроприводные и т.п.;
- конструктивным типам криогенных теплообменников: спиральновитые, пластинчато-ребристые и т.п.;
- месту (ступени охлаждения сырьевого газа), где выделяются более тяжелые углеводородные фракции;
- способу охлаждения хладагентов после компримирования: воздушное или водяное и т.п.

Каскадные процессы, применяемые в классической технологии сжижения природного газа, характеризуются тремя внешними замкнутыми холодильными циклами. Такая технология включает в себя наибольшее количество температурных уровней для охлаждения сырьевого газа, число которых может быть больше 10. В основе ее применения лежит использование хладагентов, обладающих различными температурными точками кипения, а также различных уровней давления при циркуляции этих хладагентов (рис. 3).

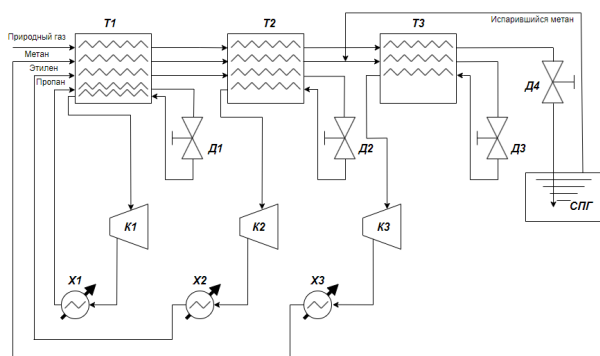


Рисунок 3. Принципиальная схема классического каскадного цикла [5]

Благодаря такому разнообразию достигается наибольшая близость каскадных процессов к теоретическим процессам с минимальными энергозатратами, но для их функциональности требуется большое количество компрессоров (K1, K2, K3), холодильных аппаратов (X1, X2, X3) и теплообменников (T1, T2, T3), что оказывается экономически нецелесообразно.

В то же время, на средне- и крупнотоннажных СПГ-проектах существует распространенная практика применения циклов сжижения на основе смешанных хладагентов (СХА). По сути, данные циклы также являются каскадными, где процесс охлаждения разбивается на несколько температурных уровней-каскадов. Однако важной преимущественной особенностью является поэтапное охлаждение СХА, частичная его конденсация и отделение более тяжелых сжиженных фракций из первоначального состава. Более легкие паровые фракции используются на последующих, более низких температурных уровнях охлаждения сырьевого газа.

Природный газ проходит предварительное охлаждение и частичную конденсацию с использованием смешанного хладагента в теплообменниках T1 и T2. После этого он подается в основной криогенный теплообменник T3. Поток разделяется на "тяжелую" и "легкую" фазы. "Тяжелая" фаза смешанного хладагента возвращается в теплообменник, где она охлаждается и конденсируется. Затем сжиженный природный газ направляется в хранилище. Для отделения азота от СПГ используется сепаратор C2, а "легкая" фаза смешанного хладагента, которая образуется при сбросе давления в дросселе D4, компрессируется и используется в качестве топливного газа [5]. Другие потоки смешанного хладагента полностью испаряются в предварительных теплообменниках и возвращаются в компрессоры (рис. 4).

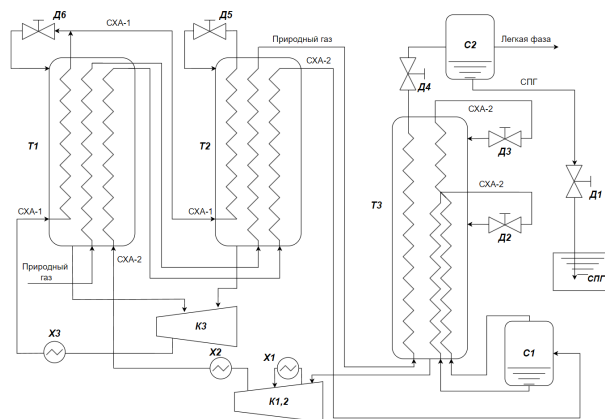


Рисунок 4. Принципиальная схема цикла с смешанными хладагентами [6]

Таким образом, главное свойство смешанного хладагента заключается не в его многокомпонентности, а в возможности изменения его состава по мере охлаждения. Это достигается благодаря многоступенчатому охлаждению и выделению из него все более легких фракций, начиная с тяжелых. Такая технология позволяет максимально использовать региональные климатические особенности расположения заводов, а, именно, холодные зимы, которые наибольшим образом преобладают в зонах добычи природного газа в России.

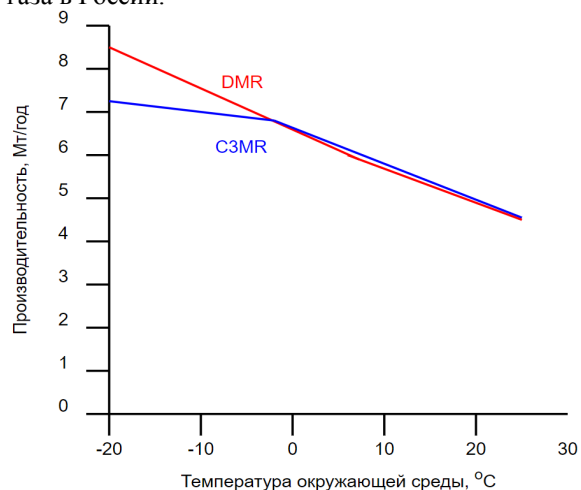


Рисунок 5. Расчетная зависимость производительности заводов СПГ от температуры окружающей среды для процессов DMR и C3MR [7]

На рис. 5 демонстрируется взаимосвязь объема выпуска СПГ от температуры окружающей среды с взятыми для сравнения двумя технологиями: DMR, основанный на смешанных хладагентах, и C3MR, который в качестве хладагента на первой ступени использует пропан. В теплое время, при температуре выше нуля, динамика производительности процессов практически одинакова. С понижением температуры эффективность обоих процессов возрастает. Рост в свою очередь обусловлен увеличением мощности турбин ( $W_T$ ), так как она прямо пропорциональна



массе объемного расхода воздуха ( $G_a$ ). Если температура окружающей среды превышает номинальную проектную точку и объемный расход установлен, массовый расход, поставляемый в камеру сгорания, будет уменьшаться [7]:

$$W_T = \rho_a V_a \Delta h_T = G_a \Delta h_T.$$

Кроме того, рост объема производства технологии DMR при температуре ниже нуля выше, что объясняется уменьшением температуры кипения исходного СХА-1, и, соответственно, увеличением итогового КПД цикла. Эффективность использования погодных условий при производстве СПГ доказывается и на практике. Данные приведены в Таблице 1.

Предоставленная информация подтверждает, что ранее сделанный вывод о том, что оптимизация работы цикла зимой приносит ощутимый прирост эффективности к производительности СПГ заводами, является верным.

Климатические условия также имеют значительное влияние на удельный расход энергии на холодильные компрессоры при производстве сжиженного газа, поскольку высокая температура увеличивает тепловую нагрузку на оборудование, что требует больше энергии для поддержания необходимого уровня охлаждения. В Таблице 2 представлены показатели удельного расхода энергии по опубликованным источникам технологий,

использованных на ряде конкретных крупнотоннажных заводов или установок СПГ.

Конечно, приведенные данные являются весьма ориентировочными, поскольку, с одной стороны, каждая группа технологий имеет множество вариантов и модификаций, и все технологии продолжают непрерывно совершенствоваться. С другой стороны, энергетическая эффективность каждой конкретной технологии зависит от большого числа других факторов, таких как единичная мощность технологической линии, исходное давление сырьевого газа, применяемые варианты технологического оборудования: компрессоров, приводных систем (газовые, паровые турбины и т.п.), видов теплообменников, систем охлаждения (водяное, воздушное).

Таким образом, с уверенностью можно утверждать, что для повышения эффективности процесса сжижения газа важно учитывать и выбирать оптимальные источники холода, а также, способы его получения и передачи. Кроме того, целесообразным является исследование и внедрение технологий на базе смешанного хладагента, которые демонстрируют отличные результаты в рамках российского климата, как указывают приведенные данные.

Таблица 1. Сравнение проектных и фактических мощностей заводов СПГ, использующих минусовые температуры в своей технологии (авторская разработка)

| Предприятие                  | Используемая технология | Проектная мощность, Мт/год | Фактическая мощность, Мт/год | Прирост эффективности, % |
|------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Россия, «Сахалин-2»          | DMR                     | 9,6                        | 11,5                         | 19,8                     |
| Россия, 4-я линия «Ямал СПГ» | Арктик-Каскад           | 0,9                        | 0,954                        | 6                        |
| Норвегия, «Snøhvit»          | MFC                     | 4,3                        | 4,73                         | 10                       |

Таблица 2. Удельный расход энергии на холодильные компрессоры для отдельных реализованных технологий (авторская разработка)

| Группы технологий                                                      | Типовые представители технологий       | Удельный расход мощности СПГ, $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{кг}}$ |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Циклы на смешанном хладагенте с предварительным пропановым охлаждением | C3MRAirProducts                        | 0,295...0,33                                                              |
| Циклы с двумя смешанными хладагентами                                  | DMR Shell и др.; Gazprom DMR           | 0,3                                                                       |
| Каскадные циклы                                                        | CoP LNG process; Conoco Phillips и др. | 0,3...0,32                                                                |
| Циклы на одном смешанном хладагенте                                    | SMR Shell и Prico; PCMR Kryopak и др.  | 0,32...0,40                                                               |



**Библиографический список**

1. Климентьев, А. А. Карта российской СПГ отрасли 2022 / А. А. Климентьев // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 4(124). – С. 50-60. – EDN MBRONH.
2. Патент № 2797608 С1 Российская Федерация, МПК F25J 1/00. Способ сжижения природного газа "АРКТИЧЕСКИЙ МИКС" : № 2023103701 : заявл. 17.02.2023 : опубл. 07.06.2023 / С. В. Руденко, П. О. Федосеев, Т. Э. Разяпов [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество "НОВАТЭК". – EDNRDAJZS.
3. Патент № 2792387 С1 Российская Федерация, МПК F25J 1/00. Способ сжижения природного газа "Арктический каскад модифицированный" и установка для его осуществления : № 2022130053 : заявл. 18.11.2022 : опубл. 21.03.2023 / С. В. Руденко, П. О. Федосеев, Н. Д. Нозиков [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество "НОВАТЭК". – EDN MBUNOG.
4. Степанов, В. В. Оптимизационные технико-экономические исследования энерготехнологических установок производства СПГ и электроэнергии с извлечением гелия: дис. ... канд. ист. наук: 05.14.01: защищена 23.06.2009: утв. 24.12.2009 / Степанов Виталий Викторович. – Иркутск, 2009. – 150 с.
5. Мещерин, И. В. Анализ технологий получения сжиженного природного газа в условиях арктического климата / И. В. Мещерин, А. Н. Настин // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2016. – № 3(284). – С. 144-157. – EDN WWKERJ.
6. Гречко, А. Г. Возможные направления оптимизации проектов крупнотоннажного производства сжиженного природного газа / А. Г. Гречко, А. И. Новиков // Газовая промышленность. – 2017. – № 6(753). – С. 74-82. – EDN YUPZKP.
7. Боровков, В. М. Влияние окружающей температуры воздуха на мощность газовой турбины / В. М. Боровков, Т. М. Абу-Рахма // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – № 1-2. – С. 3-7. – EDN KFQVFH.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию 01.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The article was submitted 01.10.2023; approved after reviewing 30.11.2023; accepted for publication 30.11.2023.

УДК 69

ГРНТИ: 67. Строительство и архитектура

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

### **РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ «ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖИЛИЩНО- КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»**

© Автор 2023

SPIN: 5729-7193

ORCID: 0000-0002-0906-716X

**ФЕДОРОВ Виктор Сергеевич**

академик РААСН, доктор технических наук,

профессор, заведующий кафедрой «Строительные  
конструкции, здания и сооружения»

*Российский университет транспорта» (МИИТ)*

*(Россия, Москва)*

Авторы: д.э.н., проф. В.Л. Курбатов, д.т.н, проф. В.И. Римшин, д.т.н., проф. Шубин И.Л., к.т.н., доц. С.В. Волкова,  
Представленное на рецензию учебное пособие имеет объем 416 стр.

Итоговой целью цифровой трансформации в нашей стране является обеспечение эффективной информационной поддержки участников строительного и жилищно-коммунального комплексов и их взаимоотношений в рамках организации процесса получения образования и управления образовательной деятельностью.

В этой связи материалы, представленные в учебном пособии «Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве», являются актуальными и важными и представляют научный интерес.

Авторы, с современных позиций, раскрывают вопросы организации строительства, в которых анализируется состояние дел, а также строится перспектива, посвященная технологии БИМ в строительстве. Здесь же даются история возникновения информационного моделирования, в которой раскрывается опыт зарубежного программного обеспечения, а также этапы жизненного цикла от проектирования до эксплуатации. В следующей главе представлена система профильной линейки ТИМ-технологий от российских производителей. Даются технологии проверки нормативных требований при формировании информационных моделей.

Достаточно емко представлены методы верификации и валидации цифровой информационной модели, которая позволяет осуществить создание и эксплуатацию информационного моделирования объекта в строительстве. Здесь же представлен классификатор строительных ресурсов.

Впервые, авторами представлены материалы по искусственному интеллекту в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве, предлагаются национальные документы в области развития искусственного интеллекта, а также даются прогнозы по его развитию.

Методически материал построен достаточно грамотно, таблицы, рисунки, размещенные в тексте позволяют читателю быстро усваивать информацию предложенную авторами. Главы и важные их разделы сопровождаются вопросами для самопроверки, позволяющие читателю проверить свои знания. Также логично материалы текста сопровождаются Приложениями.

Материалы учебного пособия вышли в свет в издательстве АСВ и имеют гриф Российской академии архитектуры и строительных наук.





## REVIEW ON THE TEXTBOOK "INFORMATION MODELING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MODERN CONSTRUCTION AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES"

© The Author(s) 2023

**FEDOROV Viktor Sergeevich**

Academician of RAACS, Dr. of Technical, Prof.

*Federal State Institution of Higher Education "Russian University of  
Transport" (MIIT)*

*(Russia, Moscow)*

The final goal of digital transformation in our country is to provide effective information support to participants in the construction and housing of communal complexes and their relations within the organization of the education process and the management of educational activities.

In this regard, the materials presented in the training manual "Information modeling and artificial intelligence in modern construction and housing and communal services" are relevant, important, and of scientific interest.

The authors present a modern perspective on the organization of construction, analyzing the current situation and establishing a broader perspective on BIM technology in construction. The textbook also gives the history of the emergence of information modeling, which reveals the experience of foreign software as well as the life cycle from design to operation. The next chapter presents the system of profile lines for TIM-technologies

from Russian manufacturers. Technologies for verification of normative requirements in the formation of information models are given.

The methods of verification and validation of the digital information model, which allows the creation and operation of the information modeling of the object in the construction, have been sufficiently presented. The classification of building resources is also presented here.

The authors present for the first time materials on AI in building, housing, and communal services, provide national guidelines in the field of AI advancement, and provide projections for its growth.

The methodical material is presented with considerable competence, and tables and drawings in the text allow the reader to quickly assimilate the information offered by the authors. Chapters and important sections are accompanied by questions for self-testing, allowing the reader to test their knowledge. Also, logically, the text materials are accompanied by annexes.

Рецензия поступила в редакцию 15.09.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The article was submitted 15.09.2023; accepted for publication 27.10.2023.

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**«ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ  
ИНТЕЛЛЕКТ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖИЛИЩНО-  
КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»**

Редакционный совет, редакционная коллегия научно-практического издания «ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» поздравляет коллектив авторов с изданием учебного пособия **«Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве»** под общей редакцией членов-корреспондентов Российской академии архитектуры и строительных наук, заслуженных строителей Российской Федерации И.Л. Шубина и В.И. Римшина.

Рецензенты:

В.И. Теличенко – академик РААСН, д.т.н., профессор, первый вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук;

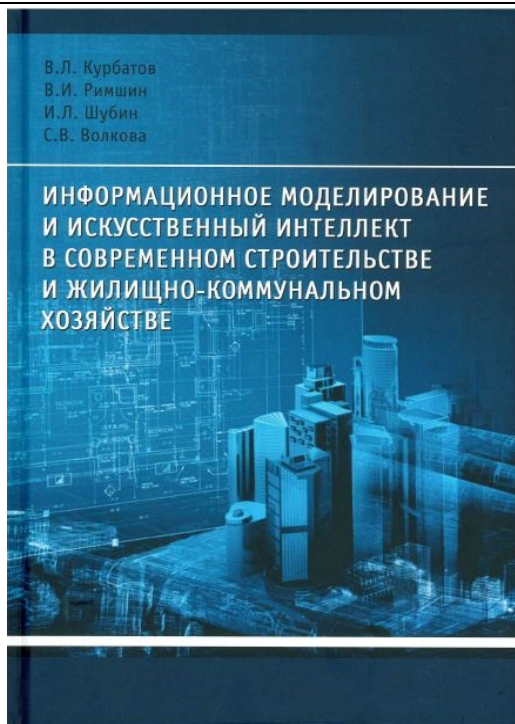
В.С. Федоров – академик РААСН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительные конструкции, здания и сооружения Института пути, строительства и сооружений ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»;

С.И. Меркулов – член-корреспондент РААСН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства Курского государственного университета.

В учебном пособии изложены принципы информационного моделирования в строительстве. Освещены современные технологии информационного моделирования, описана уже действующая и дополнительно необходимая нормативная правовая база, определяющая порядок разработки и применения информационной модели на территории Российской Федерации. Рассмотрены основные этапы и состав мероприятий при разработке проектной документации с применением информационного моделирования.

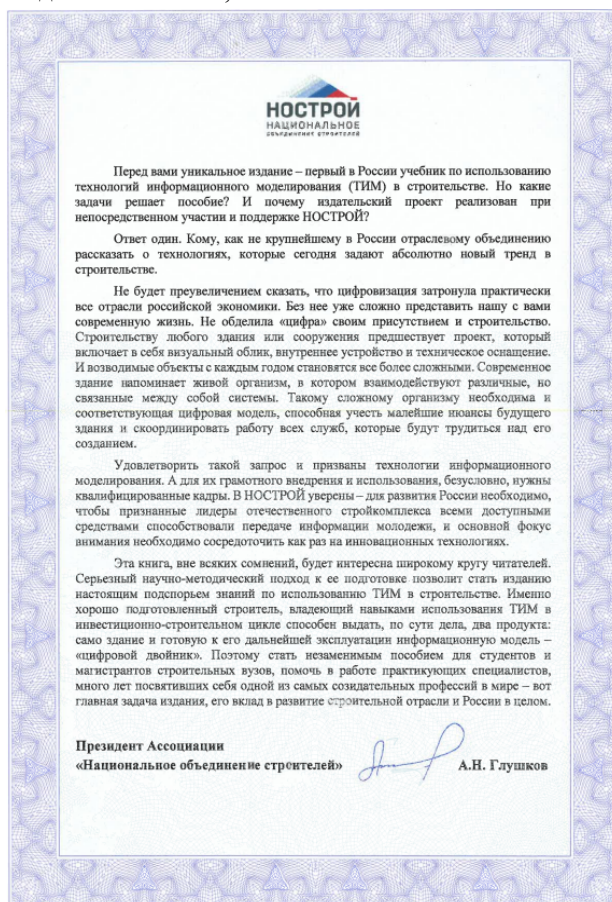
Учебное пособие предназначено для бакалавров, магистров и преподавателей вузов, обучающихся по Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования, а также для работников предприятий строительства и жилищно-коммунального комплекса.

Рекомендовано Российской академией архитектуры и строительных наук в качестве учебного пособия для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство» (бакалавриат) и 08.04.01 «Строительство» (магистратура).



**Курбатов, В.Л.**

К93 Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве: учебн. пособие / В.Л. Курбатов, В.И. Римшин, И.Л. Шубин, С.В. Волкова : Учебное пособие. – Москва : Издательство АСВ, 2023. – 420 с. ISBN: 978-5-4323-0491-9



*Редакционная коллегия  
сетевого научно-практического издания  
«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»*



## TEXTBOOK

# "INFORMATION MODELING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MODERN CONSTRUCTION AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES"

The Editorial Board and the Editorial Panel of the network scientific-practical journal "EXPERT: THEORY AND PRACTICE" congratulate the team of authors on the publication of the textbook **"Information modeling and artificial intelligence in modern construction and housing and communal services"** under the general editorial of Shubin I.L. and Rimshin V.I., who are corresponding members of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences and honored builders of the Russian Federation.

The training manual describes the principles of information modeling in construction. The contemporary technologies of information modeling are highlighted, and the regulatory legal framework, which determines the order of development and application of information modeling within the territory of the Russian Federation,

is described. The main stages and the composition of measures when developing project documentation with the application of information modeling are considered.

The training manual is intended for bachelors, masters and teachers of universities studying according to the Federal State educational standard of higher professional education, as well as for employees of construction enterprises and housing and communal complexes.

Recommended by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences as a textbook for students of educational institutions of higher education studying in the areas of training 08.03.01 "Construction" (bachelor's degree) and 08.04.01 "Construction" (master's degree).

*The Editorial Panel  
of the network scientific-practical journal  
"EXPERT: THEORY AND PRACTICE"*

### АВТОРАМ

*Автор(ы)*, самостоятельно направляя научную статью, принимают на себя следующие обязательства: передают редакции сетевого издания «ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» неисключительные права на использование научной статьи путем ее воспроизведения, использования научной статьи целиком или фрагментарно в сочетании с любым текстом, фотографиями или рисунками, в том числе, путем размещения полнотекстовых сетевых версий номеров на интернет-сайте издания.

*Автор(ы)* несет (ут) ответственность за неправомерное использование в научной статье объектов интеллектуальной собственности, объектов авторского права или «ноу-хау» в полном объеме в соответствии с действующим законодательством РФ.

*Автор(ы)* подтверждает (ют), что, направляемая статья публикуется впервые и не направлена в другое издание.

*Автор(ы)* согласен (ы) на обработку в соответствии со ст.6 Федерального закона «О персональных данных» от 27.07.2006 г. №152-ФЗ своих персональных данных, а именно: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, место(а) работы и/или обучения, контактная информация по месту работы и/или обучения, в целях опубликования представленной статьи в сетевом издании.

*Автор(ы)* подтверждает (ют), что направляемая научная статья не содержит сведений или информации с ограниченным доступом и для ее публикации не требуется разрешение Минобрнауки или других министерств и ведомств.

*Автор(ы)* научной статьи ознакомлен (ы) и согласен (ы) со следующими условиями:

- авторские права на научную статью принадлежат автору(ам) данной статьи;
- авторские права на номер сетевого издания (в целом) принадлежат учредителю сетевого издания;
- редакция сетевого издания имеет право предоставлять материалы научных статей в российские и зарубежные организации, обеспечивающие индексы научного цитирования;
- редакция сетевого издания имеет право производить необходимые уточнения и сокращения;
- вознаграждение (гонорар) за опубликованные статьи не выплачивается, материалы научных статей, направляемые в редакцию, авторам не возвращаются.

При этом авторы имеют право использовать все материалы в их последующих публикациях при условии, что будет сделана ссылка на публикацию в нашем сетевом издании.

Если при верстке в **ИнДизайне** или загрузке в **РИНЦ** (*они видят всё*) у вас в статье будет обнаружено замена однотипных букв из разных алфавитов, вставлены слова в виде формул или применены в словах некорректные символы с целью увеличения оригинальности текста (к сожалению Word и Антиплагиат этого не видят) – статья будет **удалена**, а вся информация будет передана вашей организации.

*Редакция сетевого издания  
«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»*



Требования к публикациям  
в сетевом научном издании  
«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

(включен в категорию К1 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 высылаются 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, кегль – **14**, междустрочечный интервал – **1,5**, абзацный отступ – **1 см** (это сделано для того, чтобы автор точно знал сколько страниц текста у него будет в журнале), все поля – **2 см**, литература – **В ПОРЯДКЕ ПОЯВЛЕНИЯ В ТЕКСТЕ** (желательно не менее 15 наименований, из них 5 (рекомендуется) – за последние 1-5 лет), редактор Word, тип файла – документ **Word 97-2003** (обязательно).

**Ключевые слова** (не менее 8 слов) и **аннотация** (не менее 150-200 слов) на русском и английском.

Неразрывные пробелы между цифрами, инициалами и фамилией.

Не путать тире (–) и дефис (-).

Формулы необходимо набирать в файле формата **Microsoft Word 2010** (используя опции "Вставка -> Формула"), а потом сохранять в **Word 97-2003**, в таком случае формулы становятся как картинки), размер символа - **10** (обязательно), длина формул не должна превышать **80 мм** (обязательно), латинские символы набираются курсивом, греческие – прямым шрифтом, **КИРИЛЛИЦА НЕ ДОПУСКАЕТСЯ**).

Рисунки, выполненные векторной графикой, должны быть помещены одним объектом или сгруппированы. Сканированные рисунки исполнять с раздельной возможностью не менее 300 dpi.

## Справочная информация:

1. Для определения УДК можно использовать следующие ссылки:

А) <http://teacode.com/online/udc/>

Б) <http://www.naukapro.ru/metod.htm>

2. Для проверки статьи на антиплагиат (проверка обязательна в системе **АнтиплагиатВУЗ** – все остальные дают неверные показатели) ссылка (оригинальность текста статьи должна быть не менее 75%, в тексте статьи должно быть не менее 8000 и не более 40000 знаков без пробелов):

А) <https://www.antiplagiat.ru/> (результаты хранятся у автора и высылаются по запросу редколлегии)

Статьи в обязательном порядке размещаются в системе РИНЦ – российского индекса научного цитирования (elibrary, ссылка: <http://elibrary.ru/titles.asp>), НЭБ КиберЛенинка (ссылка: <https://cyberleninka.ru>) и на сайте журнала.



Сетевое научное издание

**ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**  
**№ 4 (23) 2023 г.**

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

Материалы представлены  
в авторской редакции  
Компьютерная вёрстка А.А. Сорочайкиной  
Дизайн обложки: e-mail:  
anna.sarachai@gmail.com

Подписано для публикации на сайте  
<http://expert763.ru> 11.12.2023.  
Электронные текстовые данные (37,6 Мб).  
Распространяется бесплатно.  
Учредитель, издатель и редакция журнала -

АНО "ИССТЭ".

445047 Самарская область, г. Тольятти,  
Южное шоссе, дом 35А, офис 401,  
+7 (8482) 581090, <http://expert763.ru>,  
e-mail: [expert763@mail.ru](mailto:expert763@mail.ru)

The Online Scientific Edition

**EXPERT: THEORY AND PRACTICE**  
**№ 4 (23) 2023 г.**

Editor-in-Chief -  
Murashkin Vasily Gennadievich,  
Candidate of Technical Sciences,  
INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Signed for publication on the website  
<http://expert763.ru> 11.12.2023.  
Electronic text data (37,6 Mb)  
Distributed free of charge.  
Founder, publisher and editorial board -

INO "IFCTE".

445047, office 401, the house 35A,  
Southern Highway, Tolyatti, Samara region,  
+7 (8482) 581090, <http://expert763.ru>,  
e-mail: [expert763@mail.ru](mailto:expert763@mail.ru)