

e-ISSN: 2782-7445

p-ISSN: 2686-7818

ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

2024, №1 (24)

СЕТЕВОЕ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ
ИЗДАНИЕ

*Expert:
theory and practice*

12+

АНО «ИССТЭ»
Тольятти/Tolyatti



ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА: сетевое научно-практическое издание. 2024. № 1 (24)

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 **K2 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**



©2024 Контент доступен по лицензии CC BY-NC 4.0
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Редакционный совет:

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

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

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

БЕККЕР Александр Тевьевич – академик РААСН, Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Политехнического института Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия)

БЕЛОСТОЦКИЙ Александр Михайлович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Московский государственный строительный университет

ГАДЖИЕВ Мухлис Ахмед оглы – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции», Азербайджанский университет архитектуры и строительства (Азербайджан, Баку)

ГЕЛЬФОНД Анна Лазаревна – академик РААСН, Заслуженный работник культуры РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор архитектуры, профессор, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович – академик РААСН, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, Московский государственный строительный университет

ИЛЬИЧЕВ Владислав Александрович – академик РААСН, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный строитель, доктор технических наук, профессор, вице-президент по направлению «Инновации», Российская академия архитектуры и строительных наук (Москва, РФ)

ИСАКУЛОВ Байзак Разакович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Дизайн и строительства», «Баишев Университет» (Казахстан, Актобе)

КАПРИЕЛОВ Семен Суренович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Российская академия Архитектуры и строительных наук (Москва, Россия)

ЛЯХОВИЧ Леонид Семенович – академик РААСН, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный строитель, доктор технических наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет

ЛЯЧЕНКОВ Николай Васильевич – лауреат Государственной премии Совета министров СССР, Почетный гражданин г.о. Тольятти, действительный член Российской Академии естественных наук, член-корреспондент Международной инженерной академии, доктор технических наук, профессор, эксперт, АНО ИССТЭ (Тольятти, Россия)

МАИЛЯН Левон Рафаэлович – академик РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Россия)

РИМШИН Владимир Иванович – член-корреспондент РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор, руководитель Института развития города Университета Минстроя (НИИСФ РААСН) (Москва, Россия)

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович – академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ и РМ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (Саранск, Россия)

СОРОЧАЙКИН Андрей Никонович – заместитель главного редактора, Почетный строитель, кандидат экономических наук, доктор философских наук, 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)

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

Founder

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

Published since 2019. Published 4 times a year.

Prefix DOI: 10.51608/26867818

The certificate of mass media registration 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**



©2024 Контент доступен по лицензии CC BY-NC 4.0
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Andrey N. SOROCHAIKIN – Candidate of Economic, Dr. of Philosophy, Honorary Builder, 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; <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 Никонovich – 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

НИЗИНА Татьяна Анатольевна – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, 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

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

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

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

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

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

Alexander A. KOROSTELEV – Dr. of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Prof. of the Department of Informatics, Applied Mathematics and Methods of Their Teaching, Volga Region State University of Service (Togliatti, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

Tatyana A. NIZINA – Dr. of Technical, Advisor to RAACS, Prof., 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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРСОНАЛИИ

ПОЗДРАВЛЯЕМ С 70-ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ АКАДЕМИКА РААСН ВЛАДИМИРА ТРОФИМОВИЧА ЕРОФЕЕВА.....	11
--	-----------

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГАРИБОВ Рафаил, ХАЛИЛОВ Гусейн, БАШИРЗАДЕ Сеймур, МАХМУДОВА Лейла.....	14
--	-----------

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО АРБОЛИТА В ПРОЦЕССЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО ТВЕРДЕНИЯ ИСАКУЛОВ Баизак Разакович, АКУЛОВА Марина Владимировна, НУРГАЛИЕВ Рай Молданиязович.....	24
---	-----------

К РАСЧЕТУ ПЛАСТИН ПОЛИГОНАЛЬНОГО ОЧЕРТАНИЯ В ПЛАНЕ МЕТОДОМ КОЛЛОКАЦИЙ ПЕТРОВ Владилен Васильевич, ГОРБАЧЕВА Ольга Александровна.....	30
---	-----------

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДДИТИВНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ ФОРМ ИЗ БЕТОНА РАХИМОВ Равиль Зуфарович, МУХАМЕТРАХИМОВ Рустем Ханифович, РАХМАТУЛЛИНА Елена Сергеевна.....	34
---	-----------

ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ТОНКИХ СТЕНОК ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК РИМШИН Владимир Иванович, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, УСАНОВ Сергей Владимирович.....	42
---	-----------

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ БУТИЛКАУЧУКА ТАРАСОВА Ольга Ивановна, ЮРКИН Юрий Викторович, АВДОНИН Валерий Викторович, ТАРАДАЕВ Николай Васильевич.....	53
--	-----------

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, ОБЛЕГЧЕННЫХ НЕСЪЕМНЫМИ СФЕРИЧЕСКИМИ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТОШИН Дмитрий Сергеевич, БУЛГАКОВ Максим Евгеньевич, ЖДАНОВ Данила Геннадьевич.....	61
--	-----------

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСНОВАНИЯ ИЗ ОРТОТРОПНЫХ СЛОЕВ С УЧЕТОМ ИХ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПСЕВДОНЕОДНОРОДНОСТИ ТРЕЩЕВ Александр Анатольевич, ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич, БЕССТРАШНОВ Дмитрий Олегович.....	67
---	-----------

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВП ЯРЦЕВ Виктор Петрович, НАЗАРЧУК Андрей Павлович, ДАНИЛОВ Владислав Михайлович.....	78
--	-----------

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В НЕЛИНЕЙНО ДЕФОРМИРУЕМОМ ТЕЛЕ.

Часть 2. ДЕФОРМАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ПРОСТОМ НАГРУЖЕНИИ

КРУГЛОВ Валерий Михайлович, БАКУШЕВ Сергей Васильевич, ШЕИН Александр Иванович,
ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович, АЛЬ ДУЛАЙМИ Салман Давуд Салман,
ТОМИЛОВ Антон Алишерович..... 84

К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ ДВУХ ВИДОВ АНИЗОТРОПИИ

ТРЕЩЕВ Александр Анатольевич, ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич,
ДОРОШЕНКО Денис Игоревич..... 92

ЭКСПЕРТНОЕ МНЕНИЕ

СОВЕТЫ ОПЫТНОГО КОЛЛЕГИ ГЛАВНЫМ ИНЖЕНЕРАМ ПРОЕКТОВ

ПОДОЛЬСКИЙ Марк Семёнович.....105

УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ..... 108

CONTENT

PERSONALITIES

CONGRATULATIONS TO RAACS ACADEMICIAN VLADIMIR TROFIMOVICH EROFEYEV ON THE 70TH BIRTHDAY.....	11
--	-----------

TECHNICAL SCIENCES. BUILDING AND ARCHITECTURE

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR THE CHEMICAL KINETICS OF CORROSION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES GARIBOV Rafail, KHALILOV Huseyn, BASHIRZADE Seymur, MAHMUDOVA Leyla.....	14
---	-----------

STRUCTURE FORMATION OF SLAG-ALKALI ARBOLITE IN THE PROCESS OF FURTHER HARDENING ISAKULOV Baizak Razakovich, AKULOVA Marina Vladimirovna, NURGALIEV Rai Moldanizovich.....	24
--	-----------

TO THE CALCULATION OF POLYGONAL OUTLINE PLATES IN THE PLAN BY THE COLLOCATION METHOD PETROV Vladilen Vasilievich, GORBACHEVA Olga Aleksandrovna.....	30
---	-----------

TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF ADDITIVE CONSTRUCTION PRODUCTION OF SMALL CONCRETE FORMS RAKHIMOV Ravil Zufarovich, MUKHAMETRAKHIMOV Rustem Khanifovich, RAKHMATULLINA Elena Sergeevna.....	34
---	-----------

APPLICATION OF COGNITIVE TECHNOLOGIES FOR FORECASTING THE STRENGTH OF THIN-WALLED I-BEAMS RIMSHIN Vladimir Ivanovich, ANPILOV Sergey Mikhailovich, USANOV Sergey Vladimirovich.....	42
--	-----------

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF VIBRATION-ABSORBING COMPOSITIONS BASED ON BUTYL RUBBER TARASOVA Olga Ivanovna, YURKIN Yuri Viktorovich, AVDONIN Valeriy Viktorovich, TARADAEV Nikolay Vasilyevich.....	53
--	-----------

LOAD-BEARING CAPACITY OF LIGHTWEIGHT REINFORCED CONCRETE BEAMS BY NON-REMOVABLE SPHERICAL VOID GENERATORS TOSHIN Dmitrii Sergeevich, BULGAKOV Maxim Evgenievich, ZHDANOV Danila Gennadievich.....	61
--	-----------

MATHEMATICAL MODEL OF THE FOUNDATION FROM ORTHOTROPIC LAYERS CONSIDERING THEIR DEFORMA-TIONAL PSEUDONHOMOGENEITY TRESHCHEV Alexander Anatolyevich, TELICHKO Victor Grigorievich, BESSTRASHNOV Dmitry Olegovich.....	67
--	-----------

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ADVERSE CLIMATIC EFFECTS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF FIBERBOARDS YARCEV Viktor Petrovich, NAZARCHUK Andrey Pavlovich, DANILOV Vladislav Mihajlovich.....	78
---	-----------

MECHANICS OF A DEFORMABLE SOLID BODY

RELATIONSHIPS BETWEEN STRESSES AND DEFORMATIONS IN A NON-LINEAR DEFORMABLE BODY.

Part 2. DEFORMATION THEORY OF CONCRETE PLASTICITY UNDER SIMPLE LOADING

KRUGLOV Valery Mikhailovich, BAKUSHEV Sergey Vasilyevich, SHEIN Alexander Ivanovich,
EROFEEV Vladimir Trofimovich, AL DULAIMI Salman Dawood Salman,
TOMILOV Anton Alisherovich.....84

TO ASSESS THE INFLUENCE OF TEMPERATURE FOR DEFORMATION OF A CIRCULAR CYLINDRICAL SHELLS CONSIDERING TWO TYPES OF ANISOTROPY

TRESHCHEV Alexander Anatolyevich, TELICHKO Victor Grigorievich,
DOROSHENKO Denis Igorevich.....92

EXPERT OPINION

ADVICES FROM AN EXPERIENCED COLLEAGUE TO CHIEF PROJECT ENGINEERS

PODOLSKIY Mark Semyonovich..... 105

CONDITIONS FOR POSTING MATERIALS.....108

ПОЗДРАВЛЯЕМ С 70–ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ АКАДЕМИКА РААСН ВЛАДИМИРА ТРОФИМОВИЧА ЕРОФЕЕВА



ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович родился 10 марта 1954 г. в селе Перхляй Рузаевского района Мордовской АССР.

Окончил строительный факультет Мордовского университета (1975). Кандидат технических наук, по специальности «Строительные материалы и изделия», тема: «Полиэфирные полимербетоны каркасной структуры» (1983). Доктор технических наук по специальности «Строительные материалы и изделия», тема: «Каркасные строительные композиты» (1993), доцент (1990), профессор (1998). Член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (1998), иностранный член академии строительства Украины (2003), действительный член Российской инженерной академии (2012), действительный член строительного отделения Российской академии архитектуры и строительных наук (2017).

С 1984 года Ерофеев В.Т. был командиром строительного научно-производственного отряда «Полимербетон». Научно-исследовательские работы отряда заинтересовали Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР, которые приняли к внедрению технологию изготовления полимербетонных покрытий по каркасной технологии. Члены отряда по указанию министерства командировались в подразделения "Минмонтажспецстроя" СССР, расположенных в городах: Нижнем Новгороде, Москве, Таллине, Риге, Ленинграде и других, где молодые исследователи занимались обучением рабочих по укладке различных покрытий в зданиях с агрессивными средами.

В.Т. Ерофеев прошел десятимесячную стажировку в Лейпцигской высшей технической школе (1988). В 1989 году отряд «Полимербетон» стал лауреатом премии комсомола Республики



Мордовия и был представлен на присуждении премии ЦК ВЛКСМ.

Заведующий кафедрой строительного производства (переименована в 2004 году в кафедру строительных материалов и технологий) (с 1994 г. по 2023 г.). Декан строительного факультета (переименован в 2006 году в архитектурно-строительный) (с 2002 г. по октябрь 2022 г.). Директор института архитектуры и строительства Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва с 1 октября 2022 г. по 27 июля 2023 г. Директор НИИ «Материаловедение» (с 2016 г. по 27 июля 2023 г.).

Член межведомственного совета по присуждению премий Правительства Российской Федерации в области науки и техники по секциям: «Строительные технологии и архитектура», «Новые материалы, производственные технологии и процессы».

Заместитель председателя экспертного совета ВАК Минобрнауки РФ по строительству и архитектуре с 2013 г. по 2022 г. С апреля 2022 г. включен в состав Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России и является членом Президиума ВАК РФ.

Эксперт Российской академии наук, эксперт Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы».

Член гильдии экспертов в сфере профессионального образования, член технического комитета по стандартизации федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт).

Эксперт федеральной службы по надзору в сфере образования и науки по проведению экспертизы содержания и качества в области государственной аккредитации образовательной деятельности.

Член диссертационных советов по защите докторских диссертаций по специальностям: 2.1.5 Строительные материалы и изделия, 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения (Пензенский государственный университет архитектуры и строительства); 2.1.5 Строительные материалы и изделия, 2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов и транспортных тоннелей (Российский университет транспорта); 2.1.5 Строительные материалы и изделия (Волгоградский государственный технический университет).

Член научного совета Российской академии наук по биоповреждениям, член научного совета и бюро отделения Российской академии архитектуры и строительных наук.

Член редакционного совета журналов: «International Journal for Computational Civil and Structural Engineering»; «Academia. Архитектура и строительство»; «БСТ: Бюллетень строительной техники»; «Строительные материалы»; «Эксперт: теория и практика».

Член редакционной коллегии журналов: «Русский инженер»; «Известия высших учебных заведений. Строительство»; «Промышленное и гражданское строительство»; «Строительные материалы и изделия»; «Вестник евразийской науки»; «Транспортные сооружения»; «Приволжский научный журнал»; «Инженерные технологии и системы»; «Вестник Мордовского университета»; «Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова»; «Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура»; «Социология города».

Ответственный редактор 20 сборников научных трудов «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» в Мордовском государственном университете.

Лауреат премии комсомола Мордовии (1983). Лауреат премии Всесоюзного совета научно-технических обществ (1986). Награжден дипломом центрального совета Всесоюзного общества изобретателей и рационализаторов (1984), почетными грамотами Правительства РМ (1997, 2014), медалями ВДНХ СССР (1986) и ВВЦ (1998), бронзовой медалью Четвертого Саратовского салона изобретений, инноваций и инвестиций (2009), серебряной медалью Второго Российского форума «Российским инновациям Российский капитал» (2009), медалями конкурса на лучшую продукцию, экспонируемую на Международных специализированных выставках «Мир биотехнологии 2010-2015» (2010-2015), нагрудным знаком «Инженерная доблесть» (2014). Занесён в Книгу почета областного совета ВОИР (1985). Отличник изобретательства и рационализации Мордовской ССР (1991). Имеет благодарности Главы Республики Мордовия (1999), Государственного комитета РФ по молодежной политике РФ (2000).

Заслуженный деятель науки РМ (2001). Почетный строитель России (2004). Победитель конкурса «Инженер года РМ в области строительства и стройиндустрии» (2005), лауреат конкурса «Инженер года РФ» по версии «Профессиональные инженеры» (2005). Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2006). Заслуженный работник высшей школы Республики Мордовия (2014). Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации» (2015). Лауреат государственной премии РМ (2007), лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2014).

Награжден Большой (1997) и Малой (2003) медалями, Почетный доктор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (2003). Лауреат Огаревской премии в области технических наук (2004). Вручен сертификат признательности Поволжской ассоциации государственных классических университетов (2004). Награжден дипломом за лучшие научные и творческие работы (2009)



Российской академии архитектуры и строительных наук; нагрудным знаком «Инженерная доблесть» (2014); Почетной медалью МГСУ 1 степени (золотой) «За заслуги в строительном образовании и науке» (2014); Золотой медалью имени В.Г. Шухова «За особые достижения в науке» (2020).

Область научных интересов: исследования в области композиционных строительных материалов и ресурсосберегающих технологий, биологического сопротивления, долговечности материалов и безопасности зданий и сооружений.

Является основателем и руководителем научно-педагогической школы в области строительных материалов. Подготовил 1 доктора и 43 кандидата наук.

Количество публикаций и их цитирований впечатляет.

Под его руководством и при авторском участии подготовлено 1138 научных и учебно-методических

работ (которые имеют 9614 цитирований), в том числе 51 монография и учебных пособия с грифом УМО строительных вузов, в том числе 153 авторских свидетельств и патентов на изобретения, из них 17 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ, 6 Евразийских патента на изобретения.

В последние годы академик В.Т. Ерофеев занимается созданием бетонов нового поколения и самовосстанавливающихся железобетонных конструкций на основе бетонов, модифицированных бактериальными добавками.

С 18 сентября 2023 г. В.Т. Ерофеев профессор кафедры строительного материаловедения Института промышленного и гражданского строительства (ИПГС) Московского государственного строительного университета (Национальный исследовательский университет).

Редакция, редакционный совет, редакционная коллегия, авторы и читатели поздравляют юбиляра, члена редакционного совета нашего издания В. Т. Ерофеева с юбилейным днем рождения и желают ему, его родным и близким крепкого здоровья, счастья, благополучия, долголетия в созидательной, научной и творческой деятельности.

CONGRATULATIONS TO RAACS ACADEMICIAN VLADIMIR TROFIMOVICH EROFEYEV ON THE 70TH BIRTHDAY

EROFEYEV Vladimir Trofimovich was born on March 10, 1954, in the village of Perkhilai, Ruzayev District, Mordovskaya ASSR.

Vladimir Trofimovich graduated from the Construction Faculty of the Mordovian University (1975). He is a Candidate of Technical Sciences in specialty “Building materials and products” (1983), Doctor of Technical Sciences in specialty “Building materials and products” (1993), associate professor (1990), professor (1998). Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (1998), member of the Construction Department of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (2017).

Research interests: study in the field of composite building materials and resource-saving technologies, biological resistance, durability of materials and safety of buildings and structures.

He is the founder and head of the scientific-pedagogical school in the field of construction materials. He prepared 1 Doctor of Science and 43 Candidate of Sciences.

In recent years, the academician V.T. Erofeyev has been engaged in the research and development of new-generation concrete and self-healing reinforced concrete structures based on concrete modified with bacterial additives.

Since September 18, 2023. V. T. Erofeyev is a Professor of the Department of Construction Materials Science of Institute of Industrial and Civil Engineering (IICE) in National Research Moscow State University of Civil Engineering.

Editorial Staff, Editorial Board, Editorial Panel, authors and readers congratulate the jubilee – the member of editorial board of our publication – V. T. Erofeyev. We wish him, his family good health, happiness, well-being, longevity in a constructive, scientific, and creative activity.

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_2024_1_14

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© Авторы, 2024

SPIN: 8718-9610

ORCID 0000-0001-9500-2874

ГАРИБОВ Рафаил

доктор технических наук, профессор, советник РААСН

АНО "ИССТЭ"

(Тольятти, Россия, e-mail: srbashirzade@gmail.com)

ХАЛИЛОВ Гусейн

кандидат технических наук, доцент

*Азербайджанский университет архитектуры и
строительства*

(Баку, Азербайджан)

ORCID 0000-0002-0870-6345

БАШИРЗАДЕ Сеймур

докторант

Акденизский Университет

(Турция, Анталья)

МАХМУДОВА Лейла

кандидат химических наук, доцент

*Азербайджанский государственный университет нефти и
промышленности*

(Баку, Азербайджан)

Аннотация. Данная статья фокусируется на математическом моделировании процессов химической кинетики взаимодействия морской воды, содержащей хлорид, агрессивной среды, с железобетонными конструкциями, оборудованными стальной арматурой. Целью является уточнение математических моделей процессов коррозии железной арматуры в железобетонных конструкциях с использованием основных уравнений химической кинетики окисления железа. В рамках исследования представлен сравнительный анализ известных математических моделей, показывающий, что большинство из них представляют собой формальные модели, полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных. Как известно, использование формальных математических моделей в научных исследованиях ограничено, поскольку эти модели неспособны адекватно описать динамику процессов в других режимах. Оценка известных моделей проведена путем анализа структуры математических моделей, наличия нулевых начальных условий дифференциальных уравнений и сопоставления структуры моделей с уравнениями химической кинетики. В рамках исследования разработана новая математическая модель динамики изменения глубины коррозии стальной арматуры под воздействием морской воды с агрессивной средой. Эта модель представлена в виде нелинейного дифференциального уравнения с обыкновенными производными. Научный вклад также включает аналитические решения для нелинейного дифференциального уравнения с обыкновенными производными, рассмотренного для двух компонентов коррозии вместо четырех, при воздействии морской воды с агрессивной средой.

Ключевые слова: коррозия; морская вода; математическое моделирование; химическая кинетика; окисление; строительные конструкции



Для цитирования: Гарибов Р., Халилов Г., Баширзаде С., Махмудова Л. Разработка математических моделей химической кинетики коррозии стальной арматуры железобетонных строительных конструкций // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 14-23. doi 10.51608/26867818_2024_1_14

Original article

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR THE CHEMICAL KINETICS OF CORROSION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

© The Author(s) 2024

GARIBOV Rafail

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

KHALILOV Huseyn

PhD., Associate Professor
Azerbaijan University of Architecture and Construction
(Baku, Azerbaijan)

BASHIRZADE Seymur

PhD Candidate
Akdeniz University
(Antalya, Turkey)

MAHMUDOVA Leyla

PhD, Associate Professor
Azerbaijan State University of Oil and Industry
(Baku, Azerbaijan)

Abstract. This article focuses on the mathematical modeling of the chemical kinetics processes in the interaction of seawater containing chloride, an aggressive environment, with reinforced concrete structures equipped with steel reinforcement. The objective is to refine the mathematical models of the corrosion processes of steel reinforcement in reinforced concrete structures using the fundamental equations of the chemical kinetics of steel oxidation. The study presents a comparative analysis of known mathematical models, indicating that most of them are formal models obtained through the approximation of experimental data. As known, the use of formal mathematical models in scientific research is limited, as these models cannot adequately describe the dynamics of processes in other modes. The evaluation of known models was carried out through the analysis of the structure of mathematical models, the presence of zero initial conditions of differential equations, and the comparison of model structures with chemical kinetics equations. Within the study, a new mathematical model of the dynamics of the corrosion depth change of steel reinforcement under the influence of seawater with an aggressive environment has been developed. This model is presented in the form of a nonlinear differential equation with ordinary derivatives. The scientific contribution also includes analytical solutions for the nonlinear differential equation with ordinary derivatives, considered for two corrosion components instead of four, under the influence of seawater with an aggressive environment.

Keywords: corrosion; seawater; mathematical modeling; chemical kinetics; oxidation; building structures

For citation: Garibov R., Khalilov H., Bashirzade S., Mahmudova L. Development of mathematical models for the chemical kinetics of corrosion in reinforced concrete structures // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 14-23 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_14

Инженерные сооружения строительных конструкций различного назначения, выполненные из железобетона, подвергаются совместному

воздействию в эксплуатации совместным нагрузкам от температуры и различных агрессивных сред. Преобладающим видом воздействия агрессивных сред в конкретном случае является



какой-то один вид агрессивной среды. Наиболее широко распространенным видом агрессивных сред, имеющих контакт со строительной конструкцией, является среда, содержащая хлорид, источником её являются средства-антиобледенители, используемые при борьбе с гололедом на строительных сооружениях, морская вода либо солевой туман.

Теория расчета на прочность элементов железобетонных конструкций, работающих в неагрессивной среде, достаточно развита и обоснована, но она продолжает развиваться далее в направлении учета при превышении предельных воздействий, совершенствования оценки долговечности и живучести конструкций.

Теория расчета на прочность элементов строительных конструкций, находящихся под воздействием агрессивных и сред, при длительном их взаимодействии, только начинает разрабатываться. В этой связи известные методики расчета элементов строительных конструкций, подверженных воздействиям агрессивных сред, носят частный характер, основываются на выведенных формулах, числовые значения коэффициентов которых определяются аппроксимацией на основе математической регрессии по опытным данным.

Задача разработки неформальных уточненных математических моделей деформации и прочности несущих элементов железобетонных строительных конструкций при одновременном воздействии внешних нагрузок и агрессивных сред имеет значительный научный и практический интерес, однако является достаточно сложной, трудоемкой, поэтому еще далека до окончательного решения.

Сложность и трудоемкость формирования неформальных уточненных математических моделей деформации и прочности элементов железобетонных строительных конструкций обусловлена необходимостью одновременного рассмотрения нескольких физико-химических процессов взаимодействия агрессивной среды, её носителя с бетоном, а также с элементами его стальной арматуры: диффузии носителя с агрессивной средой через материал бетона; началом коррозии стальной арматуры бетона, а по мере роста глубины коррозии рассмотрением особенностей процессов диффузии носителя с агрессивной средой через материал коррозии на поверхности элемента стальной арматуры.

Появление коррозии стальной арматуры и её рост приводят к росту местных локальных напряжений в зонах контакта поверхности стальной арматуры и материала бетона из-за увеличения геометрического объема материала коррозии, вследствие его пористости и меньшей плотности, чем сталь. Рост глубины коррозии стальной арматуры приводит к снижению активного сечения поперечного сечения стальной арматуры, что приводит к увеличению напряжений в этом сечении со временем. Все это позволяет утверждать, что процесс образования коррозии по периметру опасного сечения поверхности стальной арматуры является главным процессом, определяющим

условия образования локальных (местных) напряжений вдоль рассматриваемого периметра сечения.

Известные уравнения, описывающие процесс образования коррозионного износа стальной арматуры, построенные на основе аппроксимации и математических регрессионных зависимостей по данным экспериментов, отражают только общую характеристику изменения глубины коррозионного износа по поверхности опасного сечения стальной арматуры. Такие математические модели являются формальными, не учитывающими кинетику действительных химических реакций коррозионного процесса. Поэтому разработка уточненной модели процесса коррозии, позволяющей учесть локальные изменения толщины коррозионного износа по длине периметра опасного сечения стальной арматуры в зависимости от локального распределения концентрации агрессивной среды в носителе по длине периметра, является актуальной.

С целью разработки неформальной математической модели процесса образования глубины коррозии стальной арматуры строительной конструкции, при длительных периодах времени под действием агрессивных сред, проводится анализ известных математических моделей коррозионного износа стальной арматуры. Рассматривается соответствие структуры модели структуре процесса коррозии по фундаментальным уравнениям химической кинетики, по возможности, определяются аналитические решения дифференциальных уравнений. В отсутствие дифференциального уравнения, описывающего процесс коррозии, из уравнения регрессионной зависимости дифференцированием по времени определяется математическое выражение самого дифференциального уравнения, сопоставляется его структура со структурой фундаментального уравнения химической кинетики. Анализируются начальные условия дифференциальных уравнений. Для формирования новой уточненной модели коррозии стальной арматуры рассматриваются все химические процессы окисления при взаимодействии агрессивной среды и её носителя с арматурой, продукты которых являются компонентами её коррозии.

В эксплуатационных условиях железо стальной арматуры железобетонной строительной конструкции может взаимодействовать с кислородом в воздухе или в морской воде, с водой, хлором и слабыми растворами кислот в воде, образуя коррозию на поверхности периметра поперечного сечения стальной арматуры. При изучении влияния агрессивных сред на коррозию стальной арматуры железобетонной строительной конструкции основное внимание уделяется влиянию концентрации слабых растворов кислот в воде на глубину слоя коррозии стальной арматуры, и пренебрегается влиянием взаимодействия железа с кислородом в воздухе или в морской воде, а также с водой. Однако, перечисленные процессы существуют, и соответственно вносят свой дополнительный вклад в рост глубину слоя коррозии



стальной арматуры. Поэтому отсутствие учета перечисленных процессов снижает точность разрабатываемых методик расчета.

Для уточнения методик расчета глубины коррозии железа стальной арматуры железобетонной строительной конструкции целесообразно рассматривать уравнения химической кинетики всех процессов, влияющих на коррозию железа, которые определяются видом и структурой уравнений химических реакций, количеством радикалов концентраций реагирующих компонентов.

В процессе нагревания на воздухе железо взаимодействует с кислородом, образуя переменного состава оксиды, мелкодисперсное железо окисляется с образованием железной окалины – Fe_2O_3 смешанного оксида железа, состав которого можно выразить формулой: Fe_3O_4 .

Анализ приведенных уравнений с (1) по (5) химических реакций окисления железа при взаимодействии носителя (морской воды), содержащей агрессивную среду с компонентами хлора, показывает, что в общем случае химический состав коррозии железа определяется следующими химическими компонентами: Fe_3O_4 , $Fe(OH)_2$, $FeCl_3$ и $FeCl_2$. Процесс образования каждого из перечисленных продуктов описывается соответствующим дифференциальным уравнением химической кинетики, в зависимости от структуры уравнения химической реакции.

В соответствии с теорией химической кинетики окисления неорганических соединений, в первом приближении, для уравнений каждой i -й из перечисленных химических реакций скорость образования концентрации c_i – го продукта химической реакции между двумя её реагирующими компонентами 1 и 2 во времени t описывается уравнением [1]

$$\frac{dc_i}{dt} = k_1 \cdot c_{1i}^{n_i} \cdot c_{2i}^{m_i} \quad (1)$$

где k_1 – константа; $c_{1i}^{n_i} \cdot c_{2i}^{m_i}$ – мгновенные (текущие) концентрации соответственно первого 1 второго 2 исходных реагирующих компонентов, участвующих в химической реакции; n_i, m_i – количество молей (радикалов) соответственно для первого 1 и второго 2 исходных реагирующих компонентов.

Перечисленные выше процессы осуществляются одновременно, параллельно и не связаны последовательностью протекания их процессов. Для бесконечно малых промежутков времени делаем допущение, что суммарная концентрация c_s продукта от всех химических реакций равна сумме концентраций каждого продукта из химических реакций. Или скорость образования суммарного продукта коррозии железа равна сумме скоростей образования составляющих коррозию её компонентов, которая может быть описана в виде дифференциального уравнения с обыкновенными производными

$$\frac{dc_s}{dt} = \frac{dc_1}{dt} + \frac{dc_2}{dt} + \frac{dc_3}{dt} \dots \frac{dc_i}{dt} = k_1 \cdot c_{1i}^{n_i} \cdot c_{2i}^{m_i} \quad (2)$$

где t – время; c_1, c_2, c_3 и c_i – концентрации продуктов соответственно первой, второй, третьей и i – ой химических реакций; k_i – константа скорости i – й химической реакции; i – индекс (номер) химической реакции; c_{1i}, c_{2i} – концентрации соответственно первого и второго реагентов i – й химической реакции; n_i, m_i – количество радикалов соответственно первого и второго реагирующих компонентов в i – й химической реакции; суммирование в уравнении (2) производится по индексу i от 1 до номера последней химической реакции в рассматриваемом процессе окисления (списке реакций - процессов).

Уравнение (1) является фундаментальным в теории химической кинетики неорганических химических реакций, т.е. неформальным. Поэтому целесообразно рассмотреть соответствие его структуры структуре известных математических моделей коррозионного изнашивания стальной арматуры под действием агрессивных сред, для выбора наилучшей модели процесса коррозионного изнашивания или обоснования формирования новой уточненной неформальной модели.

Подробный анализ особенностей процессов влияния агрессивной среды на коррозию металлов приведен во многих монографиях и обзорных статьях.

Из отечественных ученых одним из первых, исследующих коррозионные процессы металлических конструкций, является Г. В. Акимов. На основе решения уравнения для химической коррозии он получил зависимость изменения глубины поверхностного слоя δ , разрушенного вследствие коррозии от времени t в виде алгебраического уравнения следующего вида [2-3]

$$\delta(t) = k \cdot t^n \quad (3)$$

где δ – глубина коррозионного износа; k, n – константы; t – время.

Для анализа уравнения (3) посредством его дифференцирования было получено исходное дифференциальное уравнение с обыкновенными производными уравнение (4), результатом интегрирования которого является уравнение (3)

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = m \cdot t^p \quad (4)$$

где значения констант равны соответственно $m = k \cdot n$ и $p = n - 1$

Сравнительный топологический анализ структуры общего уравнения химической кинетики (1) реакции двух сред с уравнением (4) показывает, что константы k и n должны быть пропорциональны соответствующим постоянным значениям концентраций первого реагирующего компонента c_1 и второго – c_2 . Например, $m = k_1 \cdot c_1 \cdot c_2$, где k_1 – новая константа, соответствующая константе скорости рассматриваемой химической реакции. Это выражение для mv правой части дифференциального



уравнения (4) частично совпадает с математическим выражением правой части дифференциального уравнения (1) и, поэтому может считаться обоснованным и возможным для использования в приближенных расчетах изменения глубины коррозии. Второе математическое выражение t^p в правой части уравнения (4) в сочетании с концентрацией c_2 второго компонента химической реакции (железа), в виде выражения $c_2 \cdot t^p$ может приближенно описывать уменьшение её концентрации, т.е. массы железа во времени, при условии $p < 0$. Но это справедливо только для круглых сечений элементов метало строительных конструкций. Присутствие этого выражения t^p в правой части уравнения (4) приводит к тому, что с ростом времени до бесконечности химическая реакция не останавливается. Это приводит к противоречию, т.к. известно, что для конечных размеров конструкции, химическая реакция окисления должна закончиться, когда будет израсходовано все железо. Присутствие выражения t^p в правой части уравнения (4) также обуславливает отсутствие его аналитического решения при $\delta(t=0)=0$. Степенное выражение может описывать динамику изменения во времени концентрации первого компонента химической реакции окисления – агрессивной среды (не железа), в виде выражения $c_1 \cdot t^p$, однако этот случай в настоящем исследовании не рассматривается. Поэтому, при описании процессов окисления метало строительных конструкций с постоянными значениями концентраций агрессивной среды уравнение (4) неприменимо. В работе [4] также приводится несколько других уравнений, описывающих процесс коррозионного износа стальной арматуры железобетонных конструкций от действия агрессивных сред. Идентификация значений параметров уравнений производится по данным экспериментов. Но отсутствует анализ области применимости и точности использования этих уравнений. Поэтому, с целью выбора неформальной математической модели процесса и направления её совершенствования целесообразно также рассмотреть сравнительную топологию этих дифференциальных уравнений и их аналитических решений с фундаментальными уравнениями химической кинетики. Одно из уравнений этой работы и работы [5] описывает процесс глубины коррозионного износа стальной арматуры в виде

$$\delta(t) = \frac{\delta_0 \cdot t}{t + T} \quad (5)$$

где δ_0 – начальное значение коррозионного износа; T – константа; t – время.

По уравнению (5) дифференцированием получено дифференциальное уравнение с обобщенными производными (6), результатом интегрирования которого является уравнение (5)

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{\delta_0}{(t + T) \left(1 - \frac{t}{t + T}\right)} \quad (6)$$

Анализ структуры полученного дифференциального уравнения (6) и его решения в

виде уравнения (5) показывает, что из-за наличия переменной t в его правой части, как в числителе дроби, так и в знаменателях дробей, ему присущи все недостатки, рассмотренные при анализе уравнения (4). Также отсутствует аналитическое решение уравнения при начальном условии $\delta(t=0)=0$. Другой особенностью уравнения (6) является наличие зависимости скорости реакции окисления (скорость роста глубины коррозии) от значения величины глубины коррозии. Это означает, что скорость роста глубины коррозии пропорциональна количеству продукта химической реакции окисления, однако в работе отсутствуют уравнения химических реакций, подтверждающих этот процесс. Поэтому уравнение (6) является формальным и его нельзя отнести к фундаментальным уравнениям.

Следующее уравнение работ [4; 7] приводится в форме дифференциального уравнения, описывающего зависимость скорости изменения глубины коррозии на поверхности периметра опасного сечения стальной арматуры строительной конструкции во времени, пропорциональную величине глубины коррозии, в следующем виде

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = k \cdot \delta(t) \quad (7)$$

где k – константа; t – время.

В работе не приводятся уравнения химических реакций, подтверждающих этот процесс. Уравнение (7) не решается при нулевых начальных условиях $\delta(t=0)=0$. Интегрированием при начальном условии $\delta(t=0)=\delta_0$ было получено аналитическое решение дифференциального уравнения (8), которое имеет следующий вид

$$\delta(t) = \delta_0 \cdot e^{k \cdot t} \quad (8)$$

где δ_0 – начальное значение коррозионного износа; k – константа; t – время.

При условии постоянства значения концентрации агрессивной среды, в уравнении (7) константу k можно в первом приближении представить как произведение $k = k_1 \cdot c_1 \cdot c_2$, первого и второго компонентов химической реакции. Наличие пропорциональной зависимости скорости глубины коррозии во времени от величины глубины коррозии в уравнении (7) утверждает о том, что скорость образования продукта коррозии пропорциональна величине образовавшегося продукта. Но это не подтверждается особенностями физикохимии процесса окисления. Структуру правой части уравнения (7) затруднительно сопоставить со структурой правой части фундаментального уравнения химической кинетики (1), поэтому это уравнение также является формальным и его затруднительно отнести к группе неформальных уравнений, полученных из фундаментальных уравнений.

В ряде работ изложены основные направления развития различных подходов в описании процессов разрушения металлов при действии агрессивной среды с носителем. И. Г. Овчинников провел аналитический обзор методов учета воздействия агрессивных сред, приводящих к коррозии, методов расчета элементов строительных конструкций,



находящихся в агрессивной среде, и особенностей проектирования таких конструкций [7].

При анализе механического поведения металлов элементов строительных конструкций в условиях действия агрессивных сред выявлено, что влияние окружающей среды в сочетании с агрессивной средой, на механические свойства металлов обусловлено диффузионным и коррозионным химическими процессами.

Для описания двух стадий процесса диффузии и химического коррозионного процесса предлагается дифференциальное уравнение скорости изменения глубины δ коррозионного износа стальной арматуры во времени в виде [7]

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = k \cdot \delta(t) \cdot (b - \delta(t)) \quad (9)$$

где k , b – константы; t – время.

Анализ структуры уравнения (9) показывает, что при нулевом начальном условии $\delta(t=0)=0$ оно не имеет аналитического решения. Критика пропорциональной зависимости скорости глубины коррозии во времени от величины глубины коррозии в уравнении (9) подобна критике, отраженной при исследовании уравнения (7). В правой части уравнения (9) интерес представляет выражение $b - \delta(t)$, которое утверждает, что химическая реакция окисления заканчивается в определенный момент времени при условии $b = \delta(t)$, т.е. b – вполне объяснимый геометрический параметр. Поэтому выражение $b - \delta(t)$ целесообразно использовать для разработки новой неформальной модели.

Для дальнейшего анализа дифференциального уравнения (9) посредством интегрирования получено его аналитическое решение при начальном условии $\delta(t=0) = \delta_0$, которое имеет следующий вид

$$\delta(t) = m \cdot (1 - e^{k \cdot b \cdot t}) \quad (10)$$

где $m = b(\delta_0 - b)/\delta_0$; δ_0 – начальное значение глубины коррозионного износа в момент времени $t = 0$. Приведенный анализ уравнения (10) показывает, что оно также является формальным, полностью не отражающим структуру физикохимии процесса окисления.

При описании коррозионно-механического разрушения И. Г. Овчинников вводит характеристику поврежденности материала, которая зависит от различных параметров. При оценке процесса равномерного коррозионного износа в качестве параметра рассматривается критическое значение толщины окисной пленки. Предполагается, что скорость формирования окисной пленки металла и ее защитные свойства линейно зависят от количества растворенного металла (т.е. от толщины пленки $\delta(t)$). Поэтому предлагается уравнение зависимости толщины окисной пленки $\delta(t)$ от времени при постоянных внешних условиях в виде:

$$\delta(t) = d \cdot (1 - e^{a \cdot t}) \quad (11)$$

где d – диаметр стержня; a – константа.

При исследовании зависимости коррозионного износа стержня стальной арматуры во времени в

работе [4] обработка данных экспериментов также производится по этому уравнению. Анализ уравнения (16) показывает, что с ростом времени до бесконечности экспонента приближается к нулю, поэтому $\delta = d$, т.е. глубина коррозии становится равной диаметру. Однако такое было бы возможным, если создаются специальные условия, чтобы вектор скорости процесса коррозии все время направлен в одну сторону, например, вдоль одной из координатных осей, перпендикулярной оси симметрии стержня. В случае стального стержня с круглым сечением, погруженным в агрессивную среду, вектор скорости процесса коррозии распределен по каждой локальной точке поверхности круглого сечения стержня и направлен к центру круглого сечения. Если концентрация агрессивной среды не изменяется во времени и постоянная в зоне границ всех локальных точек поверхности сечения, то глубина коррозии в каждой локальной точке будет одинаковой. Поэтому процесс коррозии должен закончиться, когда глубина слоя коррозии будет равна радиусу круглого сечения стержня. Это означает, что при расчете процесса коррозии стержня с круглым сечением по уравнению (11), в уравнении параметр d должен быть равен радиусу круглого сечения.

Дифференцированием уравнения (11) по времени получено дифференциальное уравнение процесса коррозии в следующем виде

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = d \cdot a \cdot e^{a \cdot t} \quad (12)$$

Сравнительный анализ правых частей дифференциального уравнения (12) и фундаментального уравнения химической кинетики реакции окисления с двумя реагентами (1), при учете, что концентрация агрессивной среды c_1 не изменяется во времени, показывает, что константа a должна быть заменена на выражение $a = k_1 \cdot c_1$. В этом выражении константа k_1 является константой скорости химической реакции, a c_1 – постоянное значение концентрации агрессивной среды. Тогда произведение $d \cdot e^{a \cdot t}$ должно быть заменено на математическое выражение $d \cdot e^{a \cdot t} = c_2 \cdot e^{a \cdot t}$, в котором c_2 является начальным значением концентрации железа до момента начала химической реакции. Уменьшение концентрации железа во времени в ходе химической реакции описывается произведением $c_2 \cdot e^{a \cdot t}$. Введение в этом выражении экспоненты $e^{a \cdot t}$ является дискуссионным и искусственным приемом, и предназначено для приближенного описания особенностей изменения геометрических характеристик поверхности сечения стального сердечника во времени (т.е. уменьшения концентрации железа). Поэтому дифференциальное уравнение (12) нельзя отнести к группе точных неформальных уравнений, полученных на основе фундаментального уравнения химической кинетики.



В результате анализа рассмотренных выше уравнений сформированы новые модели процесса, описывающего зависимость изменения глубины коррозии стальной арматуры во времени t .

Для химического взаимодействия двух сред, приводящего к образованию одного продукта окисления, предложено новое дифференциальное уравнение, описывающее зависимость изменения глубины δ коррозии нескольких вариантов профилей стальной арматуры во времени t , в следующем виде

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = k_1 \cdot c_1 \cdot c_2(t) = k_1 \cdot c_1 \cdot F(\delta(t)) \quad (13)$$

где k_1 – константа скорости химической реакции; c_1, c_2 – мгновенные (текущие) концентрации соответственно агрессивной среды и железа, участвующих в химической реакции; $c_2(t) = F(\delta(t))$ описывается функцией изменения мгновенной концентрации железа в зависимости от роста глубины коррозии и геометрической формы профиля сечения стальной арматуры. Если используется арматура в виде стержня с круглым сечением, то мгновенная концентрация железа в данный момент времени пропорциональна мгновенной длине окружности круглого сечения. Эту зависимость можно описать в виде $c_2(t) = k_2 \cdot 2\pi \cdot (R - \delta(t))$, где R – радиус сечения круглого стержня, а k_2 – константа пропорциональности. Если арматурой является пластина, подвергающаяся воздействию агрессивной среды только по одной поверхности, $c_2(t) = k_2 \cdot (b - \delta(t))$, где b – толщина пластины. В случае воздействия агрессивной среды на обе поверхности пластины $c_2(t) = k_2 \cdot (b/2 - \delta(t))$. При использовании в качестве арматуры трубы и условия воздействия агрессивной среды только на наружную поверхность сечения трубы с радиусом R , уравнение концентрации принимает вид $c_2(t) = k_2 \cdot (R - R_2 - \delta(t))$, где R_2 – внутренний радиус трубы. В общем случае при исследовании целесообразно использовать зависимость $c_2(t) = k_2 \cdot (b - \delta(t))$, где значение константы b определяется в зависимости от размеров формы профиля сечения конкретного вида выбранной арматуры (стержень, пластина, труба и пр.).

Аналитическое решение уравнения (13) при начальном условии $\delta(0) = 0$ и использовании функции $F(\delta(t)) = (b - \delta(t))$ имеет следующий вид

$$\delta(t) = b - \exp(-k_1 \cdot c_1 \cdot t) \cdot b \quad (14)$$

Для химического взаимодействия трех сред, в виде железа и двух агрессивных сред, приводящего к образованию двух продуктов окисления, предложено новое дифференциальное уравнение, описывающее зависимость изменения глубины δ коррозии нескольких вариантов профилей стальной арматуры во времени t , в следующем виде

$$\begin{aligned} \frac{d\delta(t)}{dt} &= k_1 \cdot c_1 \cdot c_2(t) + k_2 \cdot c_3 \cdot c_2(t)^n \quad (15) \\ &= k_1 \cdot c_1 \cdot (b - \delta(t)) \\ &\quad + k_2 \cdot c_3 \cdot (b - \delta(t))^n \end{aligned}$$

где k_1, k_2 – константы скоростей соответственно первой и второй химических реакций; c_1, c_2, c_3 – мгновенные (текущие) концентрации соответственно первой агрессивной среды, железа и второй агрессивной среды, участвующих в химической реакции; n – количество молей (радикалов) железа для второй химической реакции.

Аналитическое решение уравнения (15) при начальном условии $\delta(0) = 0$ имеет следующий вид

$$\delta(t) = -\exp\left(\frac{\log\left(-\frac{k}{-\exp(k(-1+n)\left(t - \frac{-\log(\exp(\log(b)n)a+kb)+\log(b)n)}{k(-1+n)}\right)+a}\right)}{n-1}\right) + b \quad (16)$$

Дифференциальное уравнение (15) при показателе степени $n=2$ имеет вид

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = k \cdot (b - \delta) + k_1(b - \delta)^2 \quad (17)$$

Его аналитическое решение упрощается и при начальном условии $\delta(0) = 0$ имеет следующий вид

$$\delta = \frac{k - b \cdot \exp\left(k \cdot t + \log\left(\frac{k+bk_1}{b}\right)\right) + bk_1}{-\exp\left(k \cdot t + \log\left(\frac{k+bk_1}{b}\right)\right) + k_1} \quad (18)$$

Упростим уравнение (18) посредством замены (свертки) констант на константы $c = \log((k+bk_1)/b) + bk_1$, $c_1 = \log((k+bk_1)/b) + k_1$, где функция \log соответствует в языке Си натуральному логарифму. Тогда уравнение (18) примет следующий вид

$$d = \frac{k - b \cdot \exp(k \cdot t + c)}{-\exp(k \cdot t + c_1)} \quad (19)$$

Оценка точности рассмотренных известных дифференциальных уравнений и сформированных новых производилась посредством сравнения экспериментальных данных о изменении глубины коррозионного износа поверхности стальной арматуры железобетонной строительной конструкции во времени с данными расчетов по алгебраическим уравнениям, являющихся результатом решения рассматриваемых дифференциальных уравнений. Определение числовых значений констант рассматриваемых алгебраических уравнений производилось по данным эксперимента [4] посредством использования методов вычислительной математики – нелинейной математической регрессии.

Параметры рассматриваемых регрессионных известных формальных моделей и новой неформальной модели изменения глубины коррозионного износа стальной арматуры во времени при воздействии 1% водного раствора соляной кислоты приведены в таблице 1.



Таблица №1

Числовые значения параметров рассматриваемых регрессионных математических моделей изменения глубины коррозионного износа стальной арматуры во времени при воздействии 1% водного раствора соляной кислоты

№, п/п	Уравнение	Регрессионные параметры уравнения
	1	2
1	$\delta(t) = k \cdot t^n(3)$	$k = 0,35$ $n = 0,80735492$
2	$\delta(t) = \frac{\delta_o \cdot t}{t + T}, (5)$	$\delta_o = 1,7626745$ $T = 3,2531914$
3	$\delta(t) = m \cdot (1 - \exp(k_2 \cdot t)),$ (10, 11, 14) где $k_2 = k \cdot b$, для уравнения (10), $m = d$, $k_2 = a$ для уравнения (11), $m = b$, $k_2 = k_1 \cdot c_1$ для уравнения (14)	$m = 1,3885416$ $k_2 = -0,31662723$
4	$\delta(t) = \frac{(k - b \cdot \exp(k \cdot t + c))}{(-\exp(k \cdot t + c_1))},$ (19), где $c = \frac{\log((k + b \cdot k_1))}{b} + b \cdot k_1,$ $c_1 = \frac{\log((k + b \cdot k_1))}{b} + k_1$	$b = 0,12235315$ $c = 0,94271582$ $c_1 = -1,4884247$ $k = 0,31116480$

где в первом столбце таблицы в скобках указан номер алгебраического уравнения, соответствующий номеру уравнения в тексте.

Результаты расчета изменения во времени глубины коррозии стальной арматуры при воздействии 1% водного раствора соляной кислоты по уравнениям (3 – eq3), (5 – eq5), (10 – eq10), (19 – eq19) регрессионных зависимостей в графической форме отражены на рисунке 1.

Сравнительный анализ кривых графиков на рисунке 1 показывает, что регрессионное уравнение (8) в диапазоне 0...3 года удовлетворительно описывает изменение глубины коррозии стальной арматуры. Однако, с увеличением времени расчетные значения начинают существенно возрастать с ростом времени. Поэтому регрессионное уравнение (3) не может быть использовано при больших временах времени.

Из кривых графиков на рисунке 1 видно, что регрессионное уравнение (5) отличается достаточно высокой точностью описания.

При сопоставлении с данными эксперимента, исследование регрессионной экспоненциальной зависимости (8), показало, что форма кривой графика этой зависимости является вогнутой и имеются очень большие ошибки аппроксимации в сравнении с ошибками других рассматриваемых регрессионных моделей во всем рассматриваемом промежутке времени процесса коррозии. Поэтому данные исследования уравнения (8) не отображались в графической форме на рисунках 1 и 2.

При использовании уравнений (10, 11 и 14) в качестве регрессионных зависимостей при сравнении с данными эксперимента показало, что кривые графиков расчетных зависимостей

совпадают. Точность аппроксимации вполне удовлетворительная для инженерных расчетов. Необходимо указать на большую информативность неформального разработанного нового уравнения (14), т.к. при известной концентрации агрессивной среды может быть определена константа скорости химической реакции окисления.

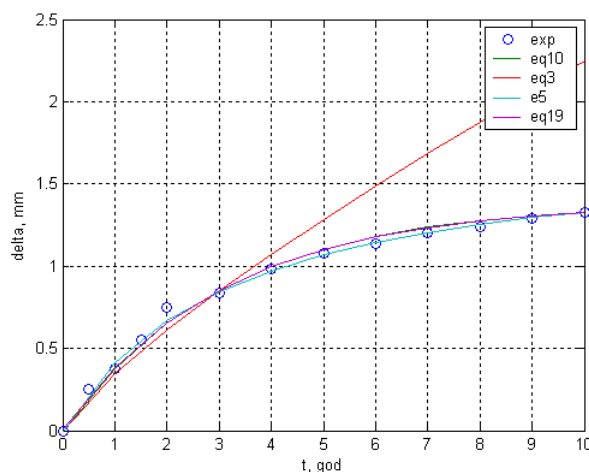


Рисунок 1 – Изменение во времени глубины коррозии стальной арматуры при воздействии 1% водного раствора соляной кислоты: о – данные эксперимента; eq3, eq5, eq10, eq19 – данные расчета по регрессионным зависимостям.

Оценка точности рассматриваемых регрессионных алгебраических уравнений



производилась на основе расчета ошибок в процентах по уравнению

$$O_1(t) = \frac{(\delta_p(t) - \delta_s(t))}{\delta_s(t)} \cdot 100 \quad (20)$$

где δ_p , δ_s – глубина коррозии соответственно расчетная и по данным эксперимента при рассматриваемых значениях времени t . Полученные массивы числовых данных об ошибках

регрессионных вычислений подвергались дополнительной обработке для формирования количественных значений статистических оценок.

Статистические оценки массива ошибок рассматриваемых регрессионных уравнений, описывающих зависимость изменения глубины коррозии стальной арматуры во времени при воздействии 1% водного раствора соляной кислоты приведены в таблице №2.

Таблица №2

Статистические оценки ошибок рассматриваемых регрессионных уравнений, описывающих зависимость изменения глубины коррозии стальной арматуры во времени при воздействии 1% водного раствора соляной кислоты

№, п/п	Статистические оценки	Номер регрессионного уравнения			
		3	5	10	19
	1	2	3	4	5
1	Максимальное	20.0000	10.5217	18.6770	15.3982
2	Минимальное	-68.877	-9.0620	-3.5798	-3.3580
3	Среднее арифметическое	-18.522	0.4739	1.7276	1.4321
4	Медиана	-14.10	-0.2717	-1.3880	-1.2408
5	Среднеквадратическое отклонение	31.304	4.5929	7.0760	6.3252
6	Размах выборки	88.8773	19.5838	22.2569	18.7562
7	Дисперсия	979.9625	21.0948	50.0697	40.008
8	Среднее гармоническое	-14.705	-0.0000	-0.0000	0.0000
9	Среднее абсолютное отклонение от среднего значения	26.424	2.7713	5.1980	4.7346
10	Выборочная процентная точка (процентиль)	-68.87	-9.0620	-3.5798	-3.3580
11	Коэффициент асимметрии	-0.2677	0.3059	1.5647	1.4843
12	Коэффициент эксцесса	1.6762	4.3366	4.0363	3.6176

Результаты расчета изменения во времени ошибки расчета глубины коррозии стальной арматуры при воздействии 1% водного раствора соляной кислоты по уравнениям (5, 10, 19) регрессионных зависимостей в графической форме отражены на рисунке 2.

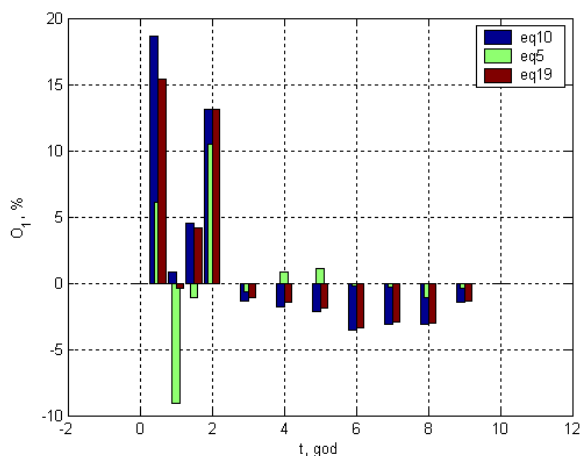


Рисунок 2 – Изменение во времени ошибки расчета глубины коррозии стальной арматуры при 1% водном растворе соляной кислоты: eq5, eq10, eq19 – данные расчета по регрессионным зависимостям.

Сравнительный анализ сформированных новых неформальных математических моделей для описания процесса изменения глубины коррозии стальной арматуры во времени t с известными моделями и показал их удовлетворительную точность для использования в исследованиях упруго-напряженного состояния строительных железобетонных конструкций.

Заключение

В результате проведенного анализа по материалам опубликованных работ структуры приведенных в них известных дифференциальных уравнений, описывающих зависимость изменения скорости глубины коррозии элементов стальной арматуры строительных конструкций во времени, под действием агрессивной среды выявлено следующее:

- уравнения не учитывают то, что в общем случае химический состав коррозии железа при взаимодействии носителя (морской воды), содержащей агрессивную среду с компонентами хлора определяется четырьмя химическими компонентами Fe_3O_4 , $Fe(OH)_2$, $FeCl_3$ и $FeCl_2$;
- в общем случае глубина коррозии стальной арматуры при взаимодействии носителя (морской воды), содержащей агрессивную среду



с компонентами хлора, должна описываться четырьмя уравнениями химической кинетики образования компонентов Fe_3O_4 , $Fe(OH)_2$, $FeCl_3$ и $FeCl_2$, с учетом по химическим формулам количества радикалов реагирующих компонентов;

- структура правых частей рассмотренных известных дифференциальных уравнений не совпадает со структурой фундаментального уравнения химической кинетики окисления неорганических веществ, что указывает на их формальность и не позволяет их отнести к группе неформальных уравнений, полученных на основе фундаментального уравнения;
- для повышения точности расчетного исследования процессов взаимодействия элементов стальной арматуры железобетонных строительных конструкций с агрессивной средой и её носителем разработаны новые неформальные модели динамики изменения глубины коррозии во времени.

Библиографический список

1. Романовский, Б. В. Основы химической кинетики / Б. В. Романовский. – М.: Изд-во «Экзамен», 2006. – 415 с.
2. Акимов, Г. В. Теория и методы исследования коррозии металлов / Г. В. Акимов. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 415 с.
3. Агафонов, В. В. Разработка физико-математической модели атмосферной коррозии металлов и метода прогнозирования их коррозионной стойкости в различных климатических районах: автореф. ... канд. техн. наук / Агафонов В. В. – М.: НИФХИ, 1978. – 25 с.
4. Гарибов, Р. Б. Прочность и деформативность железобетонных несущих конструкций при агрессивных воздействиях окружающей среды. (Экспериментальная база. Оценка сопротивления на основе математических моделей. Экспериментальное обоснование. Мониторинг эксплуатации) : специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гарибов Рафаил Баширович, 2008. – 424 с. – EDN GRNUFA.
5. Савицкий, Н. В. Прочность и деформативность железобетонных элементов, работающих в жидких сульфатных средах, агрессивных по признаку коррозии третьего вида: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. В. Савицкий. М., 1986. 23 с.
6. Ольшак, В. Теория пластичности неоднородных тел / В. Ольшак, Я. Рыхлевский, В. Урбановский. – М.: Мир, 1964. – 156 с.
7. Овчинников, И. Г. Прогнозирование работоспособности элементов конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных рабочих сред / И. Г. Овчинников, В. В. Петров // Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами: межвуз. научн. сб. – Саратов: СПИ, 1984. – С. 3-15

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

Статья поступила в редакцию 01.02.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 01.02.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья
УДК 691
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия
DOI 10.51608/26867818_2024_1_24

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО АРБОЛИТА В ПРОЦЕССЕ ДАЛЬНЕЙШЕГО ТВЕРДЕНИЯ

© Авторы 2024
SPIN: 1941-0360
ORCID 0000-0002-4597-2028
ResearcherID: AAY-2685-2020
Scopus: 58179865000

ИСАКУЛОВ Баизак Разакович
доктор технических наук, профессор
Актюбинский университет им. С. Баишева
(Казakhstan, Актобе)

SPIN: 9822-5384
ORCID 0000-0001-7569-2644
Scopus: 6506717079

АКУЛОВА Марина Владимировна
заведующая кафедрой архитектуры и урбанистики, доктор
технических наук, профессор, советник РААСН
Ивановский государственный политехнический университет
(Россия, Иваново)

НУРГАЛИЕВ Рай Молданиязович
аспирант, кафедра архитектуры и урбанистики
Ивановский государственный политехнический университет
(Россия, Иваново)

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы формирования структуры шлакощелочного арболита в процессе твердения и деформативные свойства растворной части, контактной зоны и органического заполнителя. Напряжение обжатия шлакощелочного арболита проводилось $(0,9-1,0)R_{пр}$ от призмочной прочности. Установлено, что зависимость прочности шлакощелочного бетона от исходной прочности раствора состоит из двух участков, которые характеризуют работу шлакощелочного арболитобетона в первой и второй фазах. Полученные результаты можно использовать при изготовлении эффективного стенового материала для зданий гражданского назначения, в том числе для сейсмических районов.

Ключевые слова: микроструктура; прочность; напряжения; деформация; шлакощелочной арболит; структурообразования; усадка; твердения бетона; призм-образцы

Для цитирования: Исакулов Б.Р., Акулова М.В., Нургалиев Р.М. Формирование структуры шлакощелочного арболита в процессе дальнейшего твердения // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 24-29. doi 10.51608/26867818_2024_1_24

Original article

STRUCTURE FORMATION OF SLAG-ALKALI ARBOLITE IN THE PROCESS OF FURTHER HARDENING

© The authors 2024

ISAKULOV Baizak Razakovich
Doctor of Technical Sciences, Professor
Baishev University Aqtobe
(Kazakhstan, Aktobe)

AKULOVA Marina Vladimirovna
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivanovo State Polytechnic University
(Russia, Ivanovo)



NURGALIEV Rai Moldanizovich
PhD Candidate
Ivanovo State Polytechnic University
(Russia, Ivanovo)

Abstract. The paper deals with the formation of the structure of slag-alkali arbolite during curing and the deformation properties of the mortar part, contact zone and organic aggregate. The compression stress of slag-alkali arbolite was carried out (0.9-1.0) Rpr from the prism strength. It was found that the dependence of the strength of slag-alkali concrete on the initial strength of the solution consists of two sections, which characterize the performance of slag-alkali arbolite concrete in the first and second phases. The obtained results can be used in the manufacture of effective wall material for civil buildings, including for seismic areas.

Keywords: Microstructure; strength; stresses; strain; slag-alkali arbolite; structure formation; shrinkage; concrete hardening; prism-samples

For citation: Isakulov B.R., Akulova M.V., Nurgaliev R.M. Structure formation of slag-alkali arbolite in the process of further hardening // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 24-29 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_24

Введение

В связи с бурным развитием строительной отрасли в регионах Казахстана с каждым днем возрастает потребность в строительных материалах. Особое место в производстве строительных материалов в регионах Казахстана с резко континентальным климатом занимает шлакощелочные арболитобетонные композиты, который сочетает в себе легкость, экологичность, высокие теплоизоляционные качества и может содержать в своем составе растительные и сельскохозяйственные отходы, которыми богаты районы Казахстана. Однако возросшие требования к качеству арболитобетонным композитам ставят задачу по дальнейшему повышению его строительно-эксплуатационных, технологических, прочностных и деформативных показателей. Установлено [1-10], что улучшить свойства арболитобетонных композитов можно целенаправленным изменением его свойства и структуры с различными добавками промышленных и растительных отходов в состав бетона. По анализу многочисленных данных [10-15] показывает, что в отличие от обычного арболита на основе древесной дробленки, где органический целлюлозный наполнитель на основе измельченной фибры стебли хлопчатника чаще всего является наименее прочной составляющей, шлакощелочные компоненты растворной части оказывают существенное влияние на его прочностные и деформативные характеристики. Для стеблей хлопчатника характерна в основном более равномерная складчатая структура, что делает их сходными с древесной по строению и химическому составу [5; 8; 10]. Особенности процессов структурообразования шлакощелочных арболитов обусловлены активным участием целлюлозных органических наполнителей в создании структурообразующих элементов на значительной площади контактных зон. Поэтому целью исследования является изучение процессов

структурообразования шлакощелочного арболита в процессе твердения и по результатам измерений деформации растворной части, контактной зоны и заполнителя.

Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментального исследования использовались электротермофосфорный шлак Актюбинского металлургического комбината. Шлаки применялись в виде порошков, молотых до удельной поверхности (320–330 м²/кг) в соответствии с ГОСТ 13015.0-83, ГОСТ 10180-90, ГОСТ 7076-99, ОСТ 67-11-84. В качестве щелочных компонентов применяли силикат натрия (ГОСТ 13078-81) и содосульфатную смесь – отходы производства капролактами (ГОСТ 10689-75 и ТУ 113-03-23-19-83). В сравнительных опытах также использовался портландцемент марок 400 и 500. Испытание портландцементов проведено в соответствии с ГОСТ 310.1-76, 25820-2000, 10060.3-95. Приготовление шлакощелочного вяжущего производили путем затворения размолотых шлаков растворами щелочных компонентов. Щелочной компонент вводили совместно с водой затворения в виде раствора плотностью 1100–1300 кг/м³. Прочность вяжущего определяли согласно с ГОСТ 3476-74, ГОСТ 7473-94. Нормальную густоту, сроки схватывания определяли по ГОСТ 25820-2000.

Для проведения экспериментальных работ в качестве органического заполнителя использованы измельченные фибры стеблей хлопчатника. Физико-химические свойства, химический и фракционный состав измельченных фибр стеблей хлопчатника установили опытным путем в соответствии с требованиями ГОСТ 19222-84, ГОСТ 25820-2000, а также на основании справочных и литературных данных [1-15]. Приготовление арболитовой смеси производили следующим образом: сначала осуществляли сухое перемешивание шлака с целлюлозным органическим наполнителем в виде измельченных стеблей хлопчатника, затем добавляли



заранее приготовленный раствор щелочного компонента и перемешивали до образования однородной массы. Готовую арболитовую смесь укладывали в очищенную и смазанную машинным маслом форму, штыковали, уплотняли и фиксировали в соответствии с требованиями ГОСТ

19222-84. Шлакощелочной арболит рассматривался как двухкомпонентная система, состоящей из измельченной фибры стеблей хлопчатника и шлакощелочной растворной составляющей, при этом прочность растворной части была величиной переменной (табл. 1).

Таблица 1. Результаты испытаний шлакощелочных арболитобетонных образцов с фибрами и без фибры стеблей хлопчатника

Шлак	Шлакощелочное вяжущее		Прочность растворной части, $R_{куб}$, МПа	Призмная прочность, $R_{пр}$, МПа	Модуль упругости растворной части арболита	Коэффициент Пуассона μ_p
	Щелочной компонент					
	Вид	Плотность щелочного раствора				
<i>Без фибры стеблей хлопчатника</i>						
ЭТФ шлак	ССС	1100	55	4,02	2,27	0,19
Домен. шлак	$Na_2O_2SiO_2$	1300	90	3,44	3,12	0,18
Порт-цемент	Вода		30	1,98	1,68	0,19
<i>С фибрами стеблей хлопчатника</i>						
ЭТФ шлак	ССС	1100	55	3,00	1,65	0,26
Домен. шлак	$Na_2O_2SiO_2$	1300	90	4,07	2,37	0,23
Порт-цемент	Вода		30	1,15	1,21	0,31

Примечания: ЭТФ шлак -электротермофосфорный шлак; СССР – содосульфатная смесь

Для испытаний изготовлено четыре серии образцов, пятая серия для сравнения изготовлена на поргланцементе. Каждая серия состояла из шести образцов призм размером 15x15x60 см, три из которых (модель I) состояли только из растворной части, а в трех других призмах (модель II) в середину помещались измельченные фибры стебли хлопчатника с размерами около 20-40 мм. Все образцы после тепловлажностной обработки до испытаний хранились в естественных условиях лаборатории. Регистрация продольных и поперечных деформаций в процессе нагружения образцов выполнялась тензорезисторами с базой 10-50 мм, наклеенных с помощью быстротвердеющего клея. Для сравнения прочностных и упругих характеристик использованной фибры стебли хлопчатника, имеющего насыпную плотность 600 кг/м³ и прочность при сдавливании в стандартном цилиндре 2,0 МПа, были испытаны на сжатие гранулы отдельных зерен фибры стебли хлопчатника, торцы которых отшлифованы. Результаты испытания одиночных фибры стеблей хлопчатника с размерами 20-40 мм при соотношении высоты к диаметру 1-2, полученные по 10 фибрам, показали, что среднее значение прочности фибры стебли хлопчатника составляет 2,0 МПа, модуля упругости $E_{арб}$ =3400 МПа, а коэффициента Пуассона $\mu=0,27$. Тензорезисторы, установленные на фибрах стеблей хлопчатника и на поверхности образцов, работали в основном стабильно вплоть до нагрузки (0,9-1) $R_{пр}$ бетона.

Результаты исследования

1. Исследования показали, что при введении измельченных стеблей хлопчатника в шлакощелочной раствор периоды структурообразования на ранних стадиях твердения отличаются по продолжительности от периодов формирования структуры шлакощелочного вяжущего без заполнителей. Так, первая стадия формирования структуры шлакощелочного арболитобетона составляет 25 мин, что на 15 мин меньше, чем первая стадия образования коагуляционной структуры чистой шлакощелочной дисперсии. Установлено, что первый участок, в котором возрастание прочности растворной части влечет за собой пропорциональный рост прочности, соответствует более интенсивному повышению прочности шлакощелочного арболитобетона (от 2,51 до 4,0 МПа) при изменении исходной прочности его растворной части (от 20 до 45 МПа). Второй участок характеризуется замедленным ростом прочности арболитобетона (от 3,0 до 4,17 МПа) при значительном увеличении исходной прочности его раствора (от 55,0 до 90,0 МПа). При этом средняя расчетная прочность растворной части увеличивается на 45% (от 30,3 до 43,6 МПа), а средние напряжения в фибрах стеблей хлопчатника возрастают на 20,4% (от 2,94 до 3,54 МПа) (рис.).

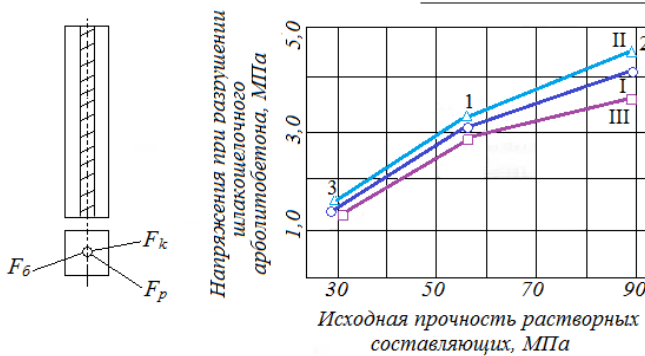


Рисунок. Модель II шлакощелочного арболитобетона и средние напряжения в бетонах 1, 2, 3 (по табл. 2) и их составляющих:
I – шлакощелочной арболитобетон;
II – шлакощелочная растворная часть;
III – измельченные фибры стеблей хлопчатника.

Средние напряжения в компонентах шлакощелочного арболитобетона в момент разрушения образца можно назвать используемой прочностью целлюлозного органического заполнителя или растворной части. Как следует из полученных данных (рис.), прочность измельченной фибры стеблей хлопчатника наиболее полно проявляется на первом участке так, при исходной прочности растворной части 30 и 55 МПа используемые прочности измельченной фибры стебли хлопчатника и шлакощелочных растворных составляющих практически равны. С увеличением исходной прочности шлакощелочного раствора используемая прочность органического заполнителя увеличивается. В то же время в таких случаях обратная закономерность отмечалась в портландцементных арболитобетонах. Полученные результаты (табл. 2) свидетельствуют о том, что обжатие фибры стеблей хлопчатника, имеющее место в рассматриваемом шлакощелочном арболитобетоне, повышает его прочность. Это обуславливает возможность выдерживания таким арболитобетоном более высокой разрушающей нагрузки ($N_{\text{опыт}}/N_{\text{расчет}} > 1$):

Таблица 2. Результаты расчета для образцов с фибрами стебли хлопчатника с учетом роли всестороннего обжатия

Номер состава по табл. 9, 10	$N_{\text{опыт}}, \Gamma$	$N_{\text{расч}}, \Gamma$	$N_{\text{опыт}}/N_{\text{расч}}$	$\sigma_{\text{арб}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{р}}, \text{МПа}$
1	2,71	2,60	1,08	2,94	30,3
2	3,95	3,95	1,01	3,54	43,6
3	2,37	1,25	1,11	1,47	15,3
4	-	-	-	2,92	30,5
5	-	-	-	1,21	13,5

В шлакощелочных арболитобетонах относительно больше сближаются свойства его растворной части и органического заполнителя на основе измельченной фибры стебли хлопчатника, чем у

портландцементного арболитобетона. При этом получается плотно упрочненный арболитобетон, обладающий благоприятной структурой, обуславливающей уменьшение концентрации напряжения в зоне контакта раствора и заполнителя.

Обсуждение результатов

1. После затворения смесей щелочным раствором на контакте «арболит – шлакощелочной раствор» протекают физико-химические процессы, характер которых определяют адгезионные связи между органическими заполнителями и шлакощелочным вяжущим камнем. При этом большое значение имеет пористое строение арболита, вызывающее отсасывание влаги арболитом сразу после приготовления смеси, что приводит к усилению адгезионных контактов между шлакощелочным вяжущим и шероховатыми поверхностями стеблей хлопчатника. Это указывает на изменение структурных характеристик композиций в период образования коагуляционной структуры. Известно, что на интенсивность развития формирования структуры, в начальный период максимального упрочнения, твердеющего материала влияет вид щелочного компонента и шлака. Можно предположить, что активная структурообразующая роль процессов, протекающих между шлакощелочным вяжущим и фибрами стеблей хлопчатника при твердении арболита, в создании плотного, прочного контактного слоя между ними, обуславливающего повышение общей прочности и монолитности бетона, сводится к улучшению условий совместной работы отдельных структурных составляющих шлакощелочных арболитобетонов под действием разрушающих усилий, одним из которых является сближение прочностных и деформативных характеристик заполнителя и растворной части бетона. Сравнение испытания образцов, приготовленных на основе шлакощелочного вяжущего, и образцов на портландцементе показало (табл. 1), что при одинаковой прочности их растворной части введение измельченной фибры стебли хлопчатника приводит к совершенно различным результатам. При этом модуль упругости фибры стебли хлопчатника в шлакощелочном растворе на 40% больше по сравнению с модулем упругости фибры стебли хлопчатника в портландцементном растворе. Это обусловлено тем, что в шлакощелочных арболитобетонах сила сцепления между камнем вяжущего и измельченным фибрами стебли хлопчатника значительно выше. В контактной зоне образуется плотная оболочка, приводящая к упрочнению структуры арболитобетона, что подтверждают результаты исследований прочности фибры стебли хлопчатника в шлакощелочном тесте. Предельные деформативные характеристики раствора и органического заполнителя, сильно отличающиеся друг от друга, становятся более близкими по своим показателям, что



приводит к уменьшению концентрации напряжения в контактной зоне, являющейся, как известно, наиболее опасной в арболитобетоне. Этим объясняется получение высокопрочного арболитобетона на низкопрочных пористых целлюлозных органических заполнителях. Для доказательства рассчитана разрушающая нагрузка образца арболитобетона без учета обжатия в нем заполнителя. Результаты расчета сравнивались с разрушающей нагрузкой, полученной экспериментально для образца с фибрами стебли хлопчатника с учетом роли его всестороннего обжатия (рис. и табл.2). Так, прочность шлакощелочного арболитобетона на втором участке увеличивается на марку, что подтверждает относительное сближение свойств, составляющих бетона. Полученные результаты дополняют представления о работе структурных компонентов в шлакощелочных арболитобетонах. Поэтому, по нашему мнению, в шлакощелочных арболитобетонах нет необходимости в применении высокопрочного органического заполнителя с высоким модулем упругости, ибо это достигается при формировании их структуры, что свидетельствует о максимальном использовании особенностей шлакощелочных вяжущих.

Выводы

1. В процессе структурообразования между шлакощелочным вяжущим и целлюлозным органическим заполнителем на основе измельченной фибры стебли хлопчатника происходит плотный, прочный контактный слой и способствует получение высокопрочного арболитобетона на основе низкопрочных пористых органических заполнителей.

2. Прочность шлакощелочного арболитобетона от исходной прочности раствора состоит из двух участков, которые характеризуют работу шлакощелочного арболитобетона в первой и второй фазах. У образцов с фибры стебли хлопчатника на основе шлакощелочного вяжущего независимо от состава разрушение происходит только по растворной части и органическому заполнителю. Проведенные исследования позволяют планировать получение эффективных стеновых несущих и ограждающих конструкции на основе серосодержащих арболитовых композитов различной прочности в зависимости от фракции зерна или от размеров фибры органического заполнителя.

Библиографический список

1. Комплексная электромеханическая активация золошламовых вяжущих для получения легких арболитобетонов / М. В. Акулова, Б. Р. Исакулов, М. Д. Джумабаев, А. М. Сартова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 1. – С. 49-52. – EDN SCHQQP.
2. Разработка состава и исследование характера формирования прочности арболитовых композитов на основе различных отходов промышленности и растительного сырья / Ю. А. Соколова, М. В. Акулова, Б. Р. Исакулов [и др.] // Научное обозрение. – 2017. – № 2. – С. 6-14. – EDN XYGCLX.
3. Жив, А. С. Ресурсосберегающие технологии получения и исследования свойств арболита на основе серосодержащих вяжущих / А. С. Жив, Б. Р. Исакулов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1(29). – С. 32-41. – EDN PVOSTR.
4. Beysenbayev O.K., Umirzakov S.I., Tleuov A.S., Smaylov B.M., Issa A.B., DzhamantikovKh., Zakirov B.S. Obtaining and research of physical and chemical properties of chelated polymer-containing microfertilizers on the basis of technogenic waste for rice seed biofortification / News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences. Volume 1, Number 433 (2019), P. 80 – 89 <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.10>
5. Bazhirov N.S., Dauletiyarov M.S., Bazhirov T.S., Serikbayev B.E., Bazhirova K.N. Research of waste of aluminum production as the raw components in technology of composite cementing materials // News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. ISSN 2224-5278. 2018. Vol. 1, N 427. P. 93-98.
6. The study of structure formation and mechanical strength properties of sulfur-containing woodcrete composites exposed to permanently acting loads / Y. Sokolova, A. Sokolova, M. Akulova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 23, Construction - The Formation of Living Environment, 55 Giai Phong Road, Hanoi, 23–26 сентября 2020 года. – 55 Giai Phong Road, Hanoi, 2020. – P. 032005. – DOI 10.1088/1757-899X/869/3/032005. – EDN BIFPOP.
7. Вайнштейн, М. З. Формирование прочности легкого бетона и механизм его деформации разрушения // Бетон и железобетон. 1984. № 6. С.8–10.
8. Ваганов, А.И. Зависимость прочности легкого бетона от свойств раствора и заполнителей // Строительная промышленность. 1950. №5. С. 15–18.
9. Гвоздев, А. А. Ползучесть бетона и пути ее исследования // Исследования прочности, пластичности и ползучести строительных материалов: сборник - М.: Госстройиздат, 1955. - 332с.
10. Sadiyeva Kh. R., Massalimova B. K., Abisheva R. D., Tsoy I. G., Nurlybayeva A. N., Darmenbayeva A. S., Ybraimzhanova L. K., Bakibaev A. A., Sapi A. K. Preparation of carbon nanocomposites on the basis of silicon-tin containing substances / News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences. Volume 4, Number 436 (2019), P. 158 – 166. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.110>
11. Detoxication of by-products of oil and gas industry accompanied by obtaining iron and sulfur-containing binders for structural building materials / Sokolova Yu. A., Akulova M. V., Isakulov B. R.,



- Sokolova A. G., Kul'sharov B. B., Isakulov A. B. // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия химии и технологии. 2020. Т. 6.. DOI: 10.32014/2020.2518-1491.99
12. Sokolova, Y., Akulova, M., Isakulov, B., Sokolova, A., Isakulov, A. The Study of the Impact of Iron and Sulfur Containing Additives on the Strength Properties of Sulfur Containing Binders // Solid State Phenomena this link is disabled, 2022, 334, pp. 195–201.
 13. The study of creep and deformation properties of sulfur-containing arbolit exposed to various compression stresses / Y. A. Sokolova, A. G. Sokolova, M. V. Akulova [et al.] // Key Engineering Materials. – 2021. – Vol. 899 KEM. – P. 137-143. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.899.137. – EDN HGXHWT.
 14. Исакулов, Б. Р. Получение высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих : специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Исакулов Баизак Разакович, 2016. – 368 с. – EDN BFCRXX.
 15. Бисенов, К. А. Легкие бетоны на основе безобжиговых цементов / К. А. Бисенов, И. К. Касимов, А. А. Тулаганов [и др.]. - Алма-Ата, 2005. - 300 с.

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

Статья поступила в редакцию 21.02.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 21.02.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья

УДК 624.04

ГРНТИ: 67: Строительство. Архитектура

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

DOI 10.51608/26867818_2024_1_30

К РАСЧЕТУ ПЛАСТИН ПОЛИГОНАЛЬНОГО ОЧЕРТАНИЯ В ПЛАНЕ МЕТОДОМ КОЛЛОКАЦИЙ

© Авторы 2024

SPIN: 2090-4982

ПЕТРОВ Владилен Васильевич

академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные материалы, конструкции и технологии»

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (Россия, Саратов, e-mail: vladilen307@gmail.com)

SPIN: 6657-0301

ГОРБАЧЕВА Ольга Александровна

ассистент кафедры «Строительные материалы, конструкции и технологии»; инженер научно-исследовательской группы

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (Россия, Саратов, e-mail: olga12zakirova@inbox.ru)

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможностей метода коллокаций для расчета пространственных конструкций сложного очертания в плане. Использован метод построения последовательности узлов коллокации на основе пропорции «золотого сечения» для пластины треугольного очертания в плане.

Ключевые слова: полигональные пластины; метод коллокаций; определение узлов коллокаций; корректирующая функция; аппроксимирующие функции; золотое сечение; строительная механика

Для цитирования: Петров В.В., Горбачева О.А. К расчету пластин полигонального очертания в плане методом коллокаций // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 30-33. doi 10.51608/26867818_2024_1_30

Original article

TO THE CALCULATION OF POLYGONAL OUTLINE PLATES IN THE PLAN BY THE COLLOCATION METHOD

© The Author(s) 2024

PETROV Vladilen Vasilievich

Academician of the RAACS, Dr. of Technical, Professor, department «Building materials, structures and technologies»

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin (Russia, Saratov, e-mail: vladilen307@gmail.com)

GORBACHEVA Olga Aleksandrovna

assistant of the department "Building materials, structures and technologies"

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin (Russia, Saratov, e-mail: olga12zakirova@inbox.ru)

Abstract. The article is devoted to the study of the possibilities of the collocation method for calculating spatial structures of a complex outline in the plan. The method of constructing a sequence of collocation nodes based on the proportion of the “golden section” for a triangular shape plate in the plan is used.

Keywords: polygonal plates; collocation method; determination of collocation nodes; correction function; approximating functions; golden section; construction mechanics

For citation: Petrov V.V., Gorbacheva O.A. To the calculation of polygonal outline plates in the plan by the collocation method // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 30-33 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_30

В практике проектирования строительных конструкций встречаются пластины самых разнообразных форм в плане. Полигональные в плане пластины могут иметь часть кромок криволинейного очертания. Для расчета таких пластин можно использовать численные методы (МКЭ, МКР и т.д.), решение которых представляется в виде численных массивов. Однако, например, при вариантном проектировании более приемлемым будет решение в виде формул, для этого необходимо рассчитать пластину сложного очертания аналитическими методами в безразмерной форме. При этом одной из важных проблем является разработка методики построения аппроксимирующих функций.

В работе [1] для расчета пластин сложного очертания использована рекомендация Л. В. Канторовича о построении аппроксимирующих функций с помощью уравнений контурных линий полигональной пластины. В работе [2] эта методика построения аппроксимирующих функций применена для расчета пластины треугольного очертания в плане методом коллокаций.

Рассмотрим пластину, имеющую в плане вид выпуклого многоугольника, состоящего из n прямолинейных или криволинейных сторон. Уравнение изгиба пластины в безразмерной форме запишем в следующем виде

$$Lu(\xi, \eta) = p(\xi, \eta) \quad (1)$$

где L – бигармонический оператор, u – безразмерный прогиб, p – безразмерная поперечная нагрузка, ξ, η – безразмерные координаты. Граничные условия формулируем также в безразмерном виде. Прогиб $u_n^*(\xi, \eta)$ будем искать в виде произведения двух функций

$$u_n^*(\xi, \eta) = \omega(\xi, \eta)K(A_n, \xi, \eta), \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

где функция $\omega(\xi, \eta) \in D(L)$, то есть удовлетворяет во всех точках контура заданным граничным условиям и четырежды дифференцируема. Этим требованиям удовлетворяет функция в виде произведения многочленов, представляющих собой левые части уравнений сторон контура пластины [2]. На каждой из сторон многочлену присваивается соответствующая степень, которая назначается из тех соображений, чтобы после выполнения граничных условий вид конкретных многочленов сохранился. В этом случае граничные условия во всех точках контура будут выполнены. Функцию $\omega(\xi, \eta)$ можно назвать *главной частью решения*. Функцию $K(A_n, \xi, \eta)$ назовем *корректирующей функцией*, которой можно

придать вид усеченного полного или неполного полинома, структура которого может изменяться при учете, например, симметрии в решаемой задаче или в других случаях. Корректирующая функция содержит неизвестные численные параметры A_n , от числа которых зависит точность решения задачи. Для определения этих неизвестных параметров существуют различные методы, которые позволяют свести задачу решения дифференциального уравнения изгиба (1) к решению алгебраических уравнений относительно A_n .

В качестве примера рассмотрим пластину, имеющую в плане вид равнобедренного треугольника (Рис.1). Пластина нагружена равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью q_0 и жестко защемлена по всему контуру.

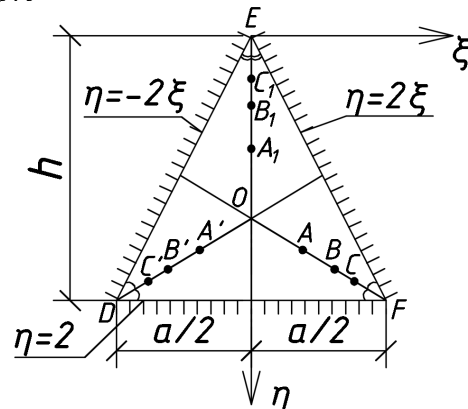


Рис.1. Расчетная схема

На Рис.1 DO , EO и FO – биссектрисы углов треугольника, $A(0.382; 1.618)$, $B(0.618; 1.764)$, $C(0.765; 1.855)$, $A_1(0; 0.854)$, $B_1(0; 0.528)$, $C_1(0; 0.326)$, $A'(0; -0.854)$, $B'(0; -0.528)$, $C'(0; -0.326)$ – точки построенные на биссектрисах.

Дифференциальное уравнение изгиба пластины имеет вид (1), где $\xi = x/a$, $\eta = y/b$ – безразмерные координаты (a – основание треугольника, b – высота равнобедренного треугольника), $u(\xi, \eta) = W/h$ – безразмерный прогиб (W – прогиб, h – толщина пластины), $\beta = a/b$ параметр удлиненности равнобедренного треугольника,

$$p_0 = 12(1 - \mu^2) \left(\frac{h}{a} \right)^4 \frac{q_0}{E} -$$

безразмерный параметр поперечной нагрузки. Дифференциальный оператор L в безразмерном виде запишется так

$$L = \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} + 2\beta^2 \frac{\partial^4}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + \beta^4 \frac{\partial^4}{\partial \eta^4}$$

Прогиб пластинки ищем в виде (2), как произведение главной части решения на корректирующую функцию, которая выбрана в виде неполного полинома с учетом симметрии пластины относительно оси η :

$$u^*(\xi, \eta) = (\eta + 2\xi)^2 (\eta - 2\xi)^2 (\eta - 2)^2 [A_0 + A_1\eta + A_2\xi^2\eta^2 + A_3\xi^4\eta^3 + A_4\xi^6\eta^4 + A_5\xi^8\eta^5] \quad (3)$$

Число искомых констант A_n зависит от заданной точности приближенного решения задачи, а $\eta - 2\xi = 0$, $\eta + 2\xi = 0$, $\eta - 2 = 0$ являются уравнениями сторон треугольника, что позволяет обеспечить удовлетворение граничных условий по контуру пластины.

Подставляя (3) в уравнение (1), найдем невязку решения

$$F_n(A_n, \xi, \eta) = Lu_n^* - p \quad (4)$$

Так как прогиб, записанный в виде (3) является приближенным решением, то необходимо выбирать способ минимизации невязки. Из имеющихся методов минимизации наиболее простым можно считать метод коллокации, предложенный Л. В. Канторовичем [3] в 1934 г., который в последующем многократно применялся разными авторами при решении различных линейных и нелинейных задач строительной механики [4-8].

Для реализации метода внутренней коллокации в срединной плоскости пластины выбирается n узлов коллокации, в которых невязку решения необходимо приравнять нулю. Получим систему n линейных алгебраических уравнений, решая которую находим искомые коэффициенты A_n .

Точность решения при расчете методом коллокации зависит от способа расположения узлов коллокации, а также их количества. В работе [2] узлы

коллокации для пластины треугольного очертания выбраны на серединах биссектрис, что позволило получить решение с инженерной точностью в четвертом приближении. В работе [9] выбор узлов коллокации для прямоугольной пластины был основан на пропорциях золотого сечения [10], что позволило получить точное решение в первом приближении.

Используем методику выбора узлов коллокации с использованием пропорций золотого сечения для пластины треугольного очертания. Точки A' , A_1 и A построены путем деления отрезков DO , EO и FO пропорцией золотого сечения, при этом отрезки OA' , OA_1 , OA берутся короткими. Таким же образом строим точки B' , B_1 и B , при этом исходными делимыми отрезками уже являются DA' , EA_1 и FA . Соответственным образом построены и узлы C' , C_1 и C (Рис. 1).

Приравнивая в выбранных узлах коллокации невязку решения (4) нулю, получим следующую систему линейных алгебраических уравнений

$$\left\{ \nabla^4 u_n^*(A_n, \xi_s, \eta_s) - p_0 = 0 \right\}_{s=A, B, C, A_1, B_1, C_1} \quad (5)$$

где n – количество узлов коллокаций, ξ_s, η_s – координаты узлов коллокаций. Так как в условиях задачи имеется симметрия относительно оси η , то для решения в первом приближении берутся узлы A , A_1 ; во втором приближении – узлы A , A_1 , B , B_1 ; в третьем приближении – узлы A , A_1 , B , B_1 , C , C_1 . Впоследствии решения данных систем уравнений, находим коэффициенты A_n . При подстановке полученных коэффициентов в (2), получим искомую функцию прогиба пластинки. Далее по известным формулам находим функции изгибающего момента M_ξ, M_η .

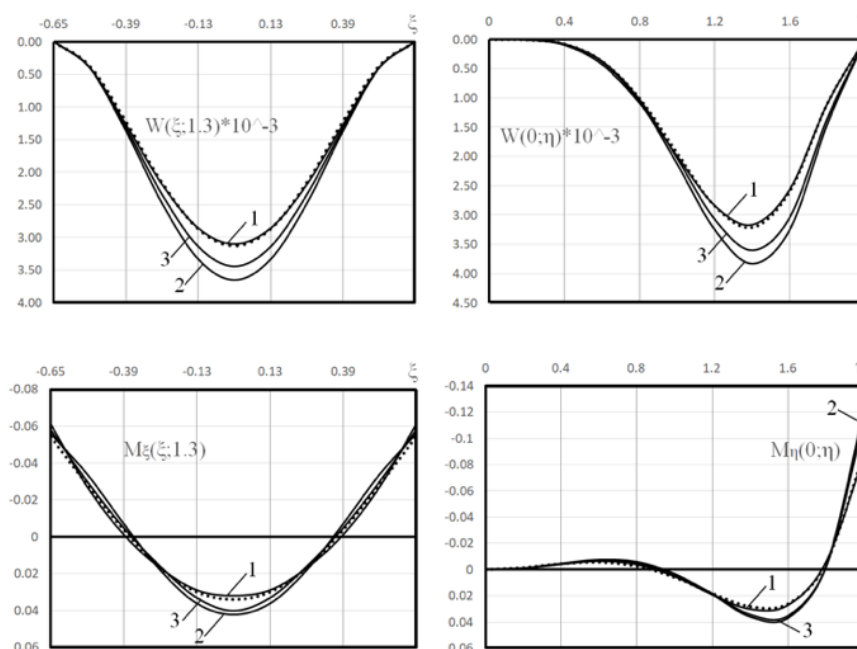


Рис. 2. Эпюры прогибов и изгибающих моментов пластины



На *Рис. 2* представлены эпюры прогибов и изгибающих моментов в сечениях проходящих через центр тяжести пластины ($\xi = 0, \eta = 1.3$) при расчете пластины методом коллокаций с использованием методики построения узлов при помощи «золотого сечения» в первом приближении (линия 1), во втором приближении (линия 2) и в третьем приближении (линия 3), а также методом коллокаций при выборе четырех узлов в работе [5] (точечная линия).

Эпюры прогибов и изгибающих моментов при расчете методом коллокаций с четырьмя узлами [5] и двумя узлами, выбранных с учетом пропорций золотого сечения, практически совпадают. Анализируя кривые эпюр прогибов, полученных при решении методом коллокаций с выбором узлов при помощи золотого сечения в первом, втором и третьем приближениях, можно отметить быструю знакопеременную сходимость. Разница между значениями прогиба в центре тяжести пластины во втором и третьем приближениях составила 5%, а между максимальными значениями изгибающего момента в жестком защемлении основания треугольной пластины – 6%.

Таким образом, анализ результатов исследования позволяет сделать вывод, что расчет пластин полигонального очертания методом коллокаций с использованием методики построения аппроксимирующих функций на базе уравнений контурных линий, а также методики выбора узлов с помощью пропорций золотого сечения позволяет получить решение с инженерной точностью с *минимальным числом узлов коллокации*, и при этом исключаются процедуры интегрирования, что существенно снижает трудоемкость решения.

Библиографический список

1. Петров, В. В. Теория расчета пластин и оболочек / Петров В. В. – М.: АСВ. 2018. – 410 с.
2. Петров, В. В. К расчету пластин сложного очертания в плане / В. В. Петров, О. А. Горбачева // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 5(14). – С. 21-26. – DOI 10.51608/26867818_2021_5_21. – EDN XSPIJO.
3. Канторович, Л. В. Об одном методе приближенного решения дифференциальных уравнений в частных производных // ДАН СССР. 1934. Т. 2, № 9. С. 532 – 534.
4. Рогалевич, В.В. Коллокационные методы. Сущность. Примеры. / В. В. Рогалевич. - Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2001. – 298 с.
5. Букша, В. В. Расчет пластин и пологих оболочек коллокационными методами / В. В. Букша, О. В. Машкин, В. В. Рогалевич. - Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2007. – 360 с.
6. Голушко, С. К. Разработка и применение метода коллокаций и наименьших невязок к решению задач механики анизотропных слоистых пластин / С. К. Голушко, С. В. Идимешев, В. П. Шапеев // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19, № 5. – С. 24-36. – EDN SXZJRH.
7. Исаев, В. И. Развитие метода коллокаций и наименьших квадратов / В. И. Исаев, В. П. Шапеев // Труды института математики и механики УрО РАН. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 41-60. – EDN KBVOKD.
8. Недорезов, П. Ф. Модифицированный метод сплайн-коллокации в задачах изгиба изотропных прямоугольных пластинок / П. Ф. Недорезов, Ю. В. Шевцова, О. М. Ромакина // Математическое моделирование и краевые задачи : Труды Второй Всероссийской научной конференции, Самара, 01–03 июня 2005 года. Часть 1. – СамГТУ, 2005. – С. 203-209.
9. Горбачева, О. А. К расчету пластин методом коллокаций / О. А. Горбачева // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 1(20). – С. 69-72. – DOI 10.51608/26867818_2023_1_69. – EDN ZFYDRX.
10. Азович А.И. От золотой пропорции к ее «производным» - М.: «Школа-Пресс», 2020. №3. – 96 с.

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

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья
УДК 691.32
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
DOI 10.51608/26867818_2024_1_34

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АДДИТИВНОГО СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ ФОРМ ИЗ БЕТОНА

© Авторы, 2024
SPIN: 7928-0242
ORCID: 0000-0002-4251-1605
Scopus: 7005848197
ResearcherID: AAG-2224-2019

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 ректората
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Казань, e-mail: rahimov11@bk.ru)

SPIN: 2599-3027
ORCID: 0000-0003-2062-5289
Scopus: 57194452261
ResearcherID: N-9429-2016

МУХАМЕТРАХИМОВ Рустем Ханифович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий строительного производства
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Казань, e-mail: muhametrahimov@mail.ru)

SPIN: 3731-1683
ORCID: 0000-0002-2368-9694
Scopus: 57224865873
ResearcherID: D-3416-2016

РАХМАТУЛЛИНА Елена Сергеевна
кандидат экономических наук, доцент, доцент Института гуманитарных и социальных наук
Автономная некоммерческая организация Университет Иннополис (Россия, Иннополис, e-mail: rahmat_es@bk.ru)

Аннотация. Аддитивные технологии представляют собой инновационный подход к производству, который становится все более значимым в мире и в России. Эти технологии позволяют создавать предметы, слой за слоем, на основе цифровых моделей, что обеспечивает более гибкие и эффективные способы производства. В мировом масштабе аддитивные технологии становятся все более распространенными в различных отраслях, включая инженерное дело, авиацию, медицину, автомобильную промышленность и многие другие. Эти технологии предлагают новые возможности и для создания малых архитектурных форм из бетона и меняют традиционные процессы их производства по стоимостным и техническим показателям. Приведены результаты исследований технико-экономической эффективности аддитивного строительного производства малых архитектурных форм.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство; 3D-печать; 3DCP; бетон; малые формы; цена; стоимость; строительные материалы

Для цитирования: Техничко-экономическая эффективность аддитивного строительного производства малых форм из бетона / Р.З. Рахимов, Р.Х. Мухаметрахимов, Е.С. Рахматуллина // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 34-41. doi 10.51608/26867818_2024_1_34



Original article

TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF ADDITIVE CONSTRUCTION PRODUCTION OF SMALL CONCRETE FORMS

© The Author(s) 2024

RAKHIMOV Ravil Zufarovich

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
(Russia, Kazan, e-mail: rahimov11@bk.ru)*

MUKHAMETRAKHIMOV Rustem Khanifovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
*Kazan State University of Architecture and Civil Engineering
(Russia, Kazan, e-mail: muhametrahimov@mail.ru)*

RAKHMATULLINA Elena Sergeevna

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
*Innopolis University
(Russia, Innopolis, e-mail: rahmat_es@bk.ru)*

Abstract. Additive technologies represent an innovative approach to production. It is becoming increasingly important in the world and in Russia. These technologies allow the creation of objects, layer by layer on the basis of digital models. This provides more flexible and efficient ways of production. Globally, additive technologies are becoming increasingly common in various industries, including engineering, aviation, medicine, automotive, and many others. These technologies also offer new opportunities for the creation of small concrete architectural forms and change their traditional production processes in terms of cost and technical parameters. The results of research of technical and economic efficiency of additive construction production of small architectural forms are given.

Keywords: additive construction production; 3D printing; 3DCP; concrete; small forms; price; cost; building materials

For citation: Technical and economic efficiency of additive construction production of small concrete forms / R.Z. Rakhimov, R.Kh. Mukhametrahimov, E.S. Rakhmatullina // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 34-41 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_34

Введение

История развития человеческой цивилизации с древних времен до настоящего времени связаны с систематическим и нарастающим развитием науки, техники и технологии [1]. В последних десятилетиях прошлого века и первых десятилетиях 21-го века в технически развитых странах во всё возрастающих объемах исследуется техническая и экономическая эффективности 3D-печати в производстве продукции на предприятиях различных отраслей. Аддитивное строительство, также известное как 3D-печать в строительстве, становится все более популярным методом производства. Этот метод позволяет создавать конструкции из различных материалов, включая бетон, металл и пластик, с использованием специализированных 3D-принтеров, реализующих

различные способы аддитивного производства [2–6]. Одной из областей применения аддитивного строительства являются "малые формы" – это могут быть небольшие строения, элементы инфраструктуры и т.д.

Исследования, связанные с технико-экономической эффективностью аддитивного строительства малых форм, обычно охватывают анализ процесса производства [7–9], свойств [10–13] и стоимости материалов [14–15], технические характеристики создаваемых конструкций [16], а также сравнение с традиционными методами строительства в аспекте экономической эффективности. Такие исследования могут включать в себя анализ затрат на материалы, время



производства, прочностные характеристики и долговечность создаваемых конструкций.

Например, Берсенева М. Л., Клиндух Н. Ю., Данченко Т. В., Якшина А. А. в статье «Экономическая эффективность аддитивных технологий в строительной отрасли» [17] описывают подход использования технологии 3D-печати для уменьшения трудоемкости производства на строительных предприятиях, увеличения точности исполнения проектов и моделирования жилищных комплексов. Авторы статьи упоминают о значительных сокращениях временных и интеллектуальных затрат на создание моделей и проектов различных строительных объектов с технологией 3D-печати.

В статье «Экономический анализ эффективности аддитивных технологий в строительстве» Т. А. Гуляева [18], исходя из проведенного расчета, делает вывод о том, что аддитивная технология является экономически выгодным способом строительства. Преимущества трехмерной строительной печати позволяют решить, в той или иной степени, проблемы с высокой стоимостью жилья в городах. При появлении на рынке подобной альтернативы возрастет и конкуренция среди застройщиков, что позволит населению выбирать жилье по различным финансовым и качественным аспектам.

На данный момент практически нет исследований, посвященных изучению вопроса экономической целесообразности создания малых архитектурных форм из бетона, т.к. их аддитивное производство все еще находится в стадии развития, но его потенциал и перспективы привлекают внимание индустрии строительства, дизайна и производства.

Ниже приведены результаты исследований эффективности аддитивного строительства на примере производства из бетона малых архитектурных форм.

Материалы и методы исследований

В работе использован метод калькуляции стоимости производства, представляющий собой системный подход к определению затрат на производство конкретного изделия. Он включает в себя различные методы и техники, которые позволяют оценить общие затраты, распределить их на единицы продукции и определить себестоимость.

Ниже приведены основные методы калькуляции стоимости производства.

1. Прямая расчетная методика: этот метод основан на точном подсчете затрат на каждый конкретный элемент производства, включая сырье, материалы, трудовые затраты, накладные расходы и другие операционные издержки. Он позволяет получить детальное представление об общей стоимости производства.

2. Нормативная методика: этот метод использует усредненные нормативы затрат, которые

основаны на стандартных стоимостях материалов, нормах расхода материалов и времени, а также средних нормах оплаты труда. Он позволяет быстро оценить себестоимость и общие затраты, хотя может не всегда точно отражать реальные затраты.

3. Гибридная методика: этот метод комбинирует прямую расчетную и нормативную методики для более точной оценки затрат. Он предполагает использование точных данных для некоторых составляющих затрат и усредненных нормативов для других, что позволяет получить более сбалансированную оценку стоимости производства.

Приведенные методы калькуляции стоимости производства позволяют определить себестоимость изделия, проанализировать затраты, принять управленческие решения и установить цену на изделие. Они важны для планирования производства, оценки эффективности процессов и оптимизации бизнес-процессов.

Аддитивное строительное производство малых архитектурных форм осуществляли в лаборатории аддитивных технологий строительного производства Казанского государственного архитектурно-строительного университета на отечественном портальном строительном 3D-принтере АМТ S-6044, реализующим метод экструзии материала [19].

В качестве исходных компонентов для бетонной смеси использовали: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, соответствующий ГОСТ 31108-2020; мелкий заполнитель – кварцевый песок Камского месторождения с модулем крупности M_k 3 в соответствии с ГОСТ 8736-2014; активную минеральную добавку – диатомит, производства ООО «Диамикс» по СТО 23998461-020-2018; пластифицирующую добавку на основе эфиров поликарбоксилатов «MasterGlenium 115» [20]; гидрофобизирующую добавку на основе полифенилэтоксисилоксана «ФЭС-50»; воду водопроводную, удовлетворяющую требованиям ГОСТ 23732-2011. Для изготовления сидения скамейки применяли комплект крепежных изделий и направляющие, и настил из древесины.

Результаты и обсуждение результатов

Для оценки технико-экономической эффективности аддитивного производства строительной продукции из разработанных модифицированных мелкозернистых бетонных смесей (МЗБС) базового состава методом послойной экструзии (3D-печати) выполнена печать скамеек С-образных и S-образных форм для благоустройства городских пространств [21–23], выполнен расчет затрат на выпуск 1 м^3 изделия с учетом тарифов, принятых в Республике Татарстан на 2023 год (таблицы 1; 2) и выполнено сравнение стоимости изделия с существующими аналогами, изготовленными различными способами формирования (таблица 3).



Таблица № 1

Калькуляция стоимости производства 1 м³ изделия (скамейка С-образной формы) из разработанной модифицированной МЗБС методом послойной экструзии

№ п/п	Наименование статей расходов	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Итого, руб.
1	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	11534,59	4117,85
2	Песок для строительных работ, модуль крупности Мк = 3	т	754,84	754,84
3	Диатомит	т	10500,00	374,85
4	Пластифицирующая добавка на основе эфиров поликарбоксилатов «MasterGlenium 115»	т	183000,00	653,31
5	Гидрофобизирующая добавка на основе полифенилэтоксисилоксана «ФЭС-50»	т	17000,00	6,07
6	Направляющие и настил из древесины 50х50х1000 мм	м	136,80	9771,35
7	Комплект крепежных изделий	шт	597,90	5338,05
8	Строительный 3D-принтер (производительность – 0,6 куб.м./ч эксплуатационный ресурс – 60 000 ч потребляемая мощность – 2,5 кВт)	шт	1672000,00	45,81
9	Амортизация 3D-принтера	шт	1672000,00	45,81
10	Расходы на содержание и ремонт оборудования (50% от п.9)	руб.	836000,00	22,91
11	Электроэнергия	кВт*ч	8,23	1,98
12	Холодная вода	м ³	32,15	6,59
13	Водоотведение	м ³	27,43	5,62
14	Стоимость аренды помещения до 200 м ²	руб.	45000,00	450,00
15	Заработная плата производственных рабочих:	руб./мес		
	Оператор-технолог – 1 чел.		60000,00	660,00
	Разнорабочий – 2 чел. (по 30 000 руб/мес)		60000,00	660,00
16	Страховые взносы (30,2% от п.15)	руб.		398,64
	Итого заводская себестоимость	руб.		23313,69
17	Прочие расходы (10% от заводской себестоимости)	руб.		2331,37
	Итого полная себестоимость	руб.		25645,06
18	Уровень плановой рентабельности (30% от полной себестоимости)	руб.		7693,52
	Оптовая цена без НДС	руб.		33338,57
19	НДС (20%)	руб.		6667,71
	Отпускная цена с НДС	руб.		40006,29



Технические науки. Строительство и архитектура

Таблица №2

Калькуляция стоимости производства 1 м³ (скамейка S-образной формы) из разработанной модифицированной МЗБС методом послойной экструзии

№ п/п	Наименование статей расходов	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Итого, руб.
1	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	11534,59	4117,85
2	Песок для строительных работ, модуль крупности Мк = 3	т	754,84	754,84
3	Диатомит	т	10500,00	374,85
4	Метакаолин	т	62330,00	2225,18
5	Пластифицирующая добавка на основе нафталинсульфоната натрия «MasterRheobuild 183»	т	61152,00	218,31
6	Гидрофобизирующая добавка «ГКЖ-11Н»	т	284000,00	101,39
7	Направляющие и настил из древесины 50х50х1000 мм	м	136,80	9771,35
8	Комплект крепежных изделий	шт	597,90	5338,05
9	Строительный 3D-принтер (производительность – 0,6 куб.м./ч эксплуатационный ресурс – 60 000 ч потребляемая мощность – 2,5 кВт)	шт	1672000,00	45,81
10	Амортизация 3D-принтера	шт	1672000,00	45,81
11	Расходы на содержание и ремонт оборудования (50% от п.9)	руб.	836000,00	22,91
12	Электроэнергия	кВт*ч	8,23	1,98
13	Холодная вода	м ³	32,15	6,59
14	Водоотведение	м ³	27,43	5,62
15	Стоимость аренды помещения до 200 м ²	руб.	45000,00	450,00
16	Заработная плата производственных рабочих:	руб./мес		
	Оператор-технолог – 1 чел.		60000,00	660,00
	Разнорабочий – 2 чел. (по 30 000 руб/мес)		60000,00	660,00
17	Страховые взносы (30,2% от п.15)	руб.		398,64
	Итого заводская себестоимость	руб.		25199,19
18	Прочие расходы (10% от заводской себестоимости)	руб.		2519,92
	Итого полная себестоимость	руб.		27719,11
19	Уровень плановой рентабельности (30% от полной себестоимости)	руб.		8315,73
	Оптовая цена без НДС	руб.		36034,84
20	НДС (20%)	руб.		7206,97
	Отпускная цена с НДС	руб.		43241,81

Для сравнения стоимости 1 м³ изделия на примере скамеек С-образных и S-образных форм для благоустройства городских пространств из разработанных модифицированных МЗБС методом аддитивного производства выполнен поиск ближайших аналогов, производимых различными


способами формования, в т.ч. методом 3D-печати в г. Казани. Результаты сравнения стоимости производства 1 м³ уличных бетонных скамеек, изготовленных различными способами формования, приведены в таблице 3 [23–25].

Таблица №3

Сравнение стоимости производства 1 м³ уличных бетонных скамеек, изготовленных различными способами формирования

Фотоиллюстрация изделия, производитель	Способ изготовления	Стоимость 1 м ³ изделия, руб.	Стоимость изделия, руб.
<p>Разработка ФГБОУ ВО КГАСУ (патент РФ №200917 [21])</p> 	3D-печать методом послойной экструзии	40006,29	4479,86
<p>Разработка ФГБОУ ВО КГАСУ (патент РФ №198776 [22])</p> 	3D-печать методом послойной экструзии	43241,81	3368,39
<p>ООО «ЗДСТРОЙ» (г. Казань)</p> 	3D-печать методом послойной экструзии	70474,95	10571,24
<p>ООО «Айташ» (г. Казань)</p> 	Формование с использованием опалубочных систем	46439,75	3000 [24]



Фотоиллюстрация изделия, производитель	Способ изготовления	Стоимость 1 м ³ изделия, руб.	Стоимость изделия, руб.
 <p>GrillRock, (г. Волгоград)</p>	Формование с использованием опалубочных систем	63750	12750 [25]

Выполненная оценка технико-экономической эффективности производства строительной продукции в виде скамеек С-образных и S-образных форм для благоустройства городских пространств из разработанных модифицированных МЗБС методом аддитивного производства позволила установить, что средняя отпускная цена за 1 м³ изделия (41624,05 руб.) на 40% ниже по сравнению с представленным на рынке аналогом, производимым способом 3D-печати, и на 10% и 34% ниже по сравнению с изделиями, формируемыми с использованием опалубочных систем. В стоимостном выражении изготовленные скамейки из разработанных МЗБС дешевле аналога, изготовленного методом 3D-печати на 6091,38 и 7202,85 рублей. Это свидетельствует о высокой экономической эффективности разработанного технологического решения, обусловленной снижением материалоемкости, отсутствием необходимости применения материально-технических и трудовых ресурсов, используемых при сборке и разборке опалубки в случае формования изделий с использованием опалубочных систем [23].

Установлены значительные экономические выгоды и потенциал для применения аддитивного производства на основе модифицированных МЗБС для создания строительной продукции (малых архитектурных форм), что может иметь важное значение для улучшения эффективности и конкурентоспособности в строительной отрасли.

Библиографический список

1. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. История науки и техники. - СПб.: Лань, 2022. 528 с.
2. Structure and properties of modified shungite concrete during electrode heating / R. Kh. Mukhametrakhimov, A. M. Garafiev, O. V. Aleksandrova, B. I. Bulgakov // Construction Materials and Products. – 2023. – Vol. 6, No. 6. – DOI 10.58224/2618-7183-2023-6-6-1. – EDN BJXLNE.
3. Fresh and mechanical properties of low-cement mortars for 3D printing / S. Klyuev, M. Ageeva, E. Fomina [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 338. – P. 127644. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.127644. – EDN IWOZMB.
4. Экспериментальные исследования процессов структурообразования композиционных смесей с техногенным механоактивированным кремнеземистым компонентом / А. В. Ключев, Н. Ф. Кашапов, С. В. Ключев [и др.] // Строительные материалы и изделия. – 2023. – Т. 6, № 2. – С. 5-18. – DOI 10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18. – EDN TIKJRQ.
5. Inozemtcev, A. Lightweight concrete for 3D-printing with internal curing agent for Portland cement hydration / A. Inozemtcev, E. Korolev, T. Q. Duong // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – No. 1(109). – P. 10915. – DOI 10.34910/MCE.109.15. – EDN EPQPUI.
6. Khozin, V. A "carbon footprint" of low water demand cements and cement-based concrete / V. Khozin, O. Khokhryakov, R. Nizamov // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012105. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012105. – EDN TIEGCD.
7. Адамцевич, А. О. Аддитивное строительное производство: особенности применения технологии / А. О. Адамцевич, А. П. Пустовгар, Л. А. Адамцевич // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 7. – С. 70-78. – DOI 10.33622/0869-7019.2023.07.70-78. – EDN VMSBNF.
8. Батраков, В. П. Влияние аддитивного производства на строительную отрасль // Научно-исследовательский центр Technical Innov. 2023. Т. 14. С. 38–41.
9. Мухаметрахимов, Р. Х. Технология и контроль качества строительной 3D-печати / Р. Х. Мухаметрахимов, Л. В. Зиганшина // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 1(59). – С. 64-79. – DOI 10.52409/20731523_2022_1_64. – EDN BZJGUO.
10. Безногова, О. Ю. Материалы для аддитивного строительного производства / О. Ю. Безногова, Е. Н. Потапова // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 3(252). – С. 16-18. – EDN BXXUPP.
11. Slavcheva, G. S. Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation / G. S. Slavcheva, O. V. Artamonova // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 8(84). – P. 97-108. – DOI 10.18720/MCE.84.10. – EDN ZSFQKH.
12. Мухаметрахимов, Р. Х. Исследование пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонов, формируемых методом 3D-печати / Р. Х. Мухаметрахимов //



- Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 5. – С. 42-58. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58. – EDN CLDKGL.
13. Mukhametrakhimov, R. Kh. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer / R. Kh. Mukhametrakhimov, L. V. Lukmanova // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 2(102). – P. 10206. – DOI 10.34910/MCE.102.6. – EDN KYROBO.
 14. Экономические перспективы использования 3D технологий в строительной отрасли / А. Ю. Жданюк, А. О. Бебес, А. П. Елисеева [и др.] // Финансовая экономика. – 2021. – № 11. – С. 319-322. – EDN KSTTIW.
 15. Ермолина, Л. В. Промышленность строительных материалов в условиях новой экономической реальности / Л. В. Ермолина, Н. Н. Пронина, Д. А. Мельникова // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 2(21). – С. 38-44. – DOI 10.51608/26867818_2023_2_38. – EDN FZDZZY.
 16. Адамцевич, А. О. Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона / А. О. Адамцевич, А. П. Пустовгар // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 18-24. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24. – EDN NWATFY.
 17. Экономическая эффективность аддитивных технологий в строительной отрасли / М. Л. Берсенева, Н. Ю. Клиндух, Т. В. Данченко, А. А. Якшина // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 3. – EDN OEQRNC.
 18. Гуляева Т.А. Экономический анализ эффективности аддитивных технологий в строительстве // Математические модели современных экономических процессов, методы анализа и синтеза экономических механизмов. Актуальные проблемы и перспективы менеджмента организаций в России: Сборник статей XIII Всероссийской научно-практической конференции. Самара: Самарский научный центр РАН, 2020. С. 154–158.
 19. Mukhametrakhimov, R. Kh. Influence Of Cement-Sand Mortar Mobility On The Quality Of 3D Printed Hardened Composite / R. Kh. Mukhametrakhimov, L. V. Lukmanova // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2021. – No. 1(94). – P. 9404. – DOI 10.4123/CUBS.94.4. – EDN RWDNPD.
 20. Мухаметрахимов, Р. Х. Исследование пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства бетонов, формируемых методом 3D-печати / Р. Х. Мухаметрахимов // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 5. – С. 42-58. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-5-42-58. – EDN CLDKGL.
 21. Патент на полезную модель № 200917 У1 Российская Федерация, МПК А47С 11/00. Скамейка с-образной формы для благоустройства городских пространств, изготовленная на 3D-принтере : № 2020110340 : заявл. 11.03.2020 : опубл. 18.11.2020 / Р. Х. Мухаметрахимов, Л. В. Лукманова, П. С. Горбунова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный архитектурно-строительный университет" (КазГАСУ). – EDN UXEXMO.
 22. Патент на полезную модель № 198776 У1 Российская Федерация, МПК А47С 11/00. Скамейка S-образной формы для благоустройства городских пространств, изготовленная на 3D-принтере : № 2020110349 : заявл. 11.03.2020 : опубл. 28.07.2020 / Р. Х. Мухаметрахимов, Л. В. Лукманова, П. С. Горбунова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный архитектурно-строительный университет" (КазГАСУ). – EDN LKFHIB.
 23. Зиганшина Л. В. Мелкозернистые бетоны в технологии аддитивного производства (3D-печати): Дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5 / Л.В. Зиганшина. - Казань, 2022. – 282 с.
 24. Скамейка бетонная «ЗВЕЗДА» [Электронный ресурс]. URL: https://aitash.ru/tovar/skameyka_betonnaya_quotzvezda_quotdyubelnyiy_krepej_bez_sborki/.
 25. Скамейка «ЕВРО» [Электронный ресурс]. URL: <https://vazon.grillrock.su/product/skamejka-evro/>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: Рахимов Р.З. – научное консультирование; доработка текста, итоговые выводы; Мухаметрахимов Р.Х. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; проведение лабораторных испытаний; выполнение расчетов, обработка результатов исследований; написание исходного текста; итоговые выводы; Рахматуллина Е.С. – развитие методологии исследования, доработка текста; итоговые выводы.

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Contribution of the authors: Rakhimov R.Z. – scientific consulting; revision of the text, final conclusions; Mukhametrakhimov R.H. – scientific guidance; research concept; development of methodology; laboratory tests; calculations, processing of research results; writing the source text; final conclusions; Rakhmatullina E.S. – development of research methodology, revision of the text; final conclusions.

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья

УДК 69.07

ГРНТИ: 30.19 Механика деформируемого твердого тела; 67 Строительство и архитектура

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

DOI 10.51608/26867818_2024_1_42

ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ТОНКИХ СТЕНОК ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

© Авторы, 2024

SPIN: 9629-5322

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: 1041-9513

ORCID: 0000-0002-6512-5803

АНПИЛОВ Сергей Михайлович

Заслуженный изобретатель РФ, советник РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры ЖБК

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

SPIN: 1144-6400

УСАНОВ Сергей Владимирович

кандидат технических наук, старший преподаватель

Кубанский государственный технологический университет

(Россия, Краснодар, e-mail: svusanov@gmail.com)

Аннотация. В данной статье рассматривается применение когнитивных технологий для прогнозирования прочности тонких стенок двутавровых балок. Экспериментальными данными послужили результаты собственных испытаний и опытов, проведенных другими исследователями. Универсальные методики расчета для балок с композитным и стальным поперечным армированием получены на основе искусственных нейронных сетей и классического регрессионного анализа. Нейросетевой и регрессионный анализ проведен в соответствующих модулях многофункционального программного продукта STATISTICA. Архитектурой нейронной сети выбран многослойный перцептрон, состоящий из трех слоев: входного, скрытого и выходного. Выборка для создания искусственной нейронной сети разделена на обучающую, тестовую и контрольную. Оба подхода продемонстрировали близкие значения опытных и расчетных разрушающих нагрузок. Алгоритм, с помощью которого нейросетевая и регрессионная модели реализованы в виде десктопного приложения, написан на языке программирования Python. Преимуществами Python являются простой синтаксис и широкие возможности использования библиотек и инструментов, в том числе для создания приложений с графическим интерфейсом. Приложение разработано на основе кроссплатформенного графического тулкита Tkinter. В условиях происходящей цифровой трансформации и переходу к уровню BIM Level 3 предлагаемый алгоритм может также быть удобно интегрирован в соответствующие BIM-модели.

Ключевые слова: когнитивные технологии; прогнозирование прочности стенок; искусственные нейронные сети; регрессионный анализ; тонкостенные балки; поперечная арматура; язык программирования; BIM-технологии; машинное обучение

Для цитирования: Применение когнитивных технологий для прогнозирования прочности тонких стенок двутавровых балок / Римшин В.И., Анпилов С.М., Усанов С.В. // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 42-52. doi 10.51608/26867818_2024_1_42



Original article

APPLICATION OF COGNITIVE TECHNOLOGIES FOR FORECASTING THE STRENGTH OF THIN-WALLED I-BEAMS

© The Author(s) 2024

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)

ANPILOV Sergey Mikhailovich

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof. of the Department

Novosibirsk State Architectural and Construction University (Russia, Novosibirsk, e-mail: anpilovsm@gmail.com)

USANOV Sergey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer

Kuban State Technological University

(Krasnodar, Russia, e-mail: svusanov@gmail.com)

Abstract. This paper discusses the application of cognitive technology to predict the strength of thin-walled I-beams. Experimental data were the results of own tests and experiments conducted by other researchers. Universal calculation methods for beams with composite and steel transverse reinforcement were obtained on the basis of artificial neural networks and classical regression analysis. Neural network and regression analysis were performed in the corresponding modules of the multifunctional software product STATISTICA. The neural network architecture is a multilayer perceptron consisting of three layers: input, hidden and output. The sample for creating the artificial neural network is divided into training, test, and validation. Both approaches demonstrated close values of experimental and calculated failure loads. The algorithm by which the neural network and regression models are implemented as a desktop application is written in the Python programming language. The advantages of Python are its simple syntax and wide possibilities of using libraries and tools, including for creating applications with a graphical interface. The application is developed on the basis of the cross-platform graphical toolkit Tkinter. With the ongoing digital transformation and the transition to BIM Level 3, the proposed algorithm can also be conveniently integrated into the corresponding BIM-models.

Keywords: cognitive technologies, web-shear strength prediction, artificial neural networks, regression analysis, thin-walled beams, shear reinforcement, programming language, BIM-technologies, machine learning

For citation: Application of cognitive technologies for forecasting the strength of thin-walled i-beams / V.I. Rimshin, S.M. Anpilov, S.V. Usanov // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 42-52 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_42

Введение

Когнитивный компьютеринг – перспективное направление реализации в строительной отрасли федерального проекта «Цифровая образовательная среда».

Прогнозирование прочности конструктивных элементов может быть достигнуто путем создания облачных и десктопных программных продуктов, написанных на различных языках программирования. Одним из наиболее популярных языков является Python, относящийся к высокоуровневым интерпретируемым языкам. Среди

его преимуществ помимо кроссплатформенности можно отметить простой синтаксис и логику, широкие возможности использования различных библиотек и инструментов, позволяющих создавать приложения быстро и эффективно [1-2]. Для ряда стандартных операций разработаны такие библиотеки как Tkinter, Flask, Django и ряд других.

Алгоритмы, созданные на языке Python, активно применяются в проектировании зданий и сооружений с использованием технологий информационного моделирования, называемых



также BIM-технологиями [3]. Перспективным направлением происходящей цифровой трансформации является переход к уровню BIM Level 3, который предполагает использование концепции согласованного управления данными [4]. В качестве открытого международного информационного стандарта для обмена и совместного использования данных рассматриваются отраслевые базовые классы IFC (Industry Foundation Classes – ISO 16739; ГОСТ Р 10.0.02: 2019).

Действующая концепция Четвертой промышленной революции Индустрия 4.0 включает в себя новые цифровые технологии, в том числе машинное обучение, которое в течение последних десятилетий активно внедряется в строительную отрасль [5-14]. В основе машинного обучения лежит применение искусственных нейронных сетей (ИНС). Особенно эффективно использование ИНС для решения задач с ограниченным количеством исходных данных и точно неуставленном взаимном влиянии на искомую величину различных действующих факторов. В строительстве наибольшее распространение получили ИНС со следующей архитектурой: многослойный перцептрон, метод опорных векторов и прочие [15-21].

В современных условиях эффективной заменой традиционному армированию строительных конструкций из стальных стержней служит

композитная полимерная арматура [22]. Использование композитных материалов наиболее оправдано в тех случаях, когда максимально эффективно можно использовать их преимущества, а недостатки не будут критичными. К преимуществам композитных стержней относят высокую прочность на растяжение, коррозионную стойкость, радиопрозрачность, низкую теплопроводность и малый удельный вес, к недостаткам – низкие модуль упругости и огнестойкость.

Целью настоящей работы является реализация технологии когнитивного компьютеринга для расчетов прочности тонкостенных балок по бетонной полосе между наклонными сечениями. Объектом исследования служили балки двутаврового сечения с базальтокомпозитным и стальным поперечным армированием (таблицы 1 и 2), изготовленные и испытанные авторами в лаборатории кафедры строительных конструкций КубГУ [25; 29], а также тавровые и двутавровые железобетонные балки других исследователей [23-24; 26–28].

Одним из недостаточно изученных вопросов остается прочность наклонных сечений тавровых и двутавровых балок, армированных как традиционной стальной, так и композитной арматурой. Если для железобетонных образцов накоплено значительное количество соответствующих экспериментальных данных, то для балок с поперечным композитным армированием их число ограничено.

Характеристики испытанных балок и балок других авторов

Таблица 1

№ п/п	Автор	Шифр балки	a/h_0	α , град	b , мм	h_0 , мм	R_b , МПа	μ_w , %	E , МПа	Q_{exp} , кН
1	Тамов М.М. [23]	Б1	1,60	90,00	30	260	31,90	0,59	170	88,70
2		Б2	1,60	90,00	30	260	26,90	0,59	170	68,10
3		Б6	1,60	90,00	30	260	29,80	0,59	170	81,80
4		Б19	3,20	90,00	30	260	28,00	0,59	170	52,10
5		Б23	3,20	90,00	30	260	24,80	0,59	170	48,90
6		Б24	3,20	90,00	30	260	31,90	0,59	170	61,90
7		Б25	3,20	90,00	30	260	30,80	0,59	170	59,60
8		Б27	3,20	90,00	30	260	26,90	1,64	170	62,90
9		Б28	3,20	90,00	30	260	30,80	1,64	170	78,10
10		Б29	3,20	90,00	30	260	32,40	1,64	170	82,70
11		Б30	3,20	90,00	30	260	33,00	1,64	170	84,10
12	Leonhardt F. [24]	NR8	2,00	90	60	350	14,25	2,78	200	120
13		NR10	2,00	90	60	350	22,71	3,29	200	225
14		NT8-1	2,00	90	60	350	19,03	2,78	200	210
15		NT10	2,00	90	60	350	16,21	3,29	200	165
16		T1	3,00	90	100	830	23,3	1,41	200	800
17		T2	3,00	45	100	830	21,06	1,43	200	1160
18	Усанов С.В. [25]	Б1	1,6	90	30	260	27,0	0,4	56	54,9
19		Б2	1,6	90	30	260	27,3	0,7	56	57,6
20		Б3	1,6	90	30	260	28,5	1,0	56	77,4
21		Б5	1,6	45	30	260	24,5	0,4	56	61,7
22		Б6	1,6	45	30	260	25,4	0,7	56	62,1
23		Б7	1,6	45	30	260	28,7	1,0	56	76,2
24		Б8	1,6	45	30	260	25,2	1,3	56	70,5
25		Б9	2,5	90	30	260	27,2	0,4	56	42,7
26		Б10	2,5	90	30	260	27,2	0,7	56	47,1
27		Б11	2,5	90	30	260	29,4	1,0	56	51,2



№ п/п	Автор	Шифр балки	a/h_0	α , град	b , мм	h_0 , мм	R_b , МПа	μ_w , %	E , МПа	Q_{exp} , кН
28		Б13	2,5	45	30	260	25,2	0,4	56	48,1
29		Б14	2,5	45	30	260	25,2	0,7	56	50,3
30	Усанов С.В. [25]	Б16	2,5	45	30	260	24,1	1,3	56	55,4
31		Б18	3,2	90	30	260	30,7	0,7	56	48,7
32		Б21	3,2	45	30	260	27,7	0,4	56	42,8
33		Б23	3,2	45	30	260	25,7	1,0	56	46,3
34		Б24	3,2	45	30	260	25,7	1,0	56	56,2
35		Б11Э	3,2	90	30	260	28,9	1,0	170	65,1
36		Б12Э	3,2	90	30	260	28,9	1,3	170	74,5
37		Б19Э	3,2	90	30	260	29,7	1,0	170	62,5
38		Rangan B. V. [26]	I-1	2,5	90	74	563	34,3	2,72	200
39	I-3		2,5	90	63	563	29,3	3,19	200	369,1
40	I-4		2,5	90	64	563	335,5	1,77	200	416,0
41	Алиев Г.С. [27]	БТ-II-1(а)	2	90	42	330	16	1,75	200	102,5
42		БТ-II-1(б)	2	90	43	330	16	1,36	200	95
43		БО-II-3	2	90	45	330	18	1,63	200	106,9
44	Абдуллаев А.Р. [28]	БД-I-3д	3	90	52	320	20	1,46	200	114,9

Характеристики дополнительных балок

Таблица 2

№ п/п	Автор	Шифр балки	a/h_0	α , град	b , мм	h_0 , мм	R_b , МПа	μ_w , %	E , МПа	Q_{exp} , кН
1	Тамов М.М. [23]	Б20	3,2	90	30	260	28,2	0,59	170	56,2
2	Усанов С.В. [25]	Б4	1,6	90	30	260	27,5	1,3	56	71,5
3		Б20Э	3,2	90	30	260	29,7	1,3	170	70,8
4	Rangan B. V. [26]	I-2	2,5	90	74	563	28,4	1,53	200	371
5	Абдуллаев А.Р. [28]	БД-I-3	3	90	51	322	22,2	1,48	200	118,1

Несмотря на различия свойств композитной и стальной арматуры, согласно действующим нормам проектирования методика расчета прочности армированных стенок в обоих случаях совпадает. Таким образом, эмпирические зависимости не учитывают как ряд дополнительных факторов, влияющих на прочность тонкой стенки, так и взаимное влияние всех параметров. В имеющихся источниках есть примеры вычисления несущей способности наклонных сечений балок на основе ИНС [30-32], однако для прочности тонкостенных балок эта задача не решалась.

Рассмотрены только образцы, разрушение которых произошло в результате раздробления бетона стенки. Общее количество балок в датасете равно 44, что является достаточным для обеспечения статистической значимости независимых переменных по всем показателям. В таблице 1 приведены характеристики каждого образца, которые включали относительный пролет среза a/h_0 (x1), угол наклона поперечной арматуры α (x2), толщину стенки b (x3), рабочую высоту балок h_0 (x4),

призменную прочность бетона R_b (x5), процент поперечного армирования μ_w (x6), модуль упругости поперечной арматуры E (x7) и величину разрушающей поперечной силы $Q_{exp}(y)$, которую необходимо будет получить в дальнейшем с помощью искусственной нейронной сети и классического регрессионного анализа.

Методология

Нейросетевой и регрессионный анализ выполнен в соответствующих модулях многофункционального программного продукта STATISTICA (Neural Networks и Nonlinear Estimation). Образцы имеют характеристики, значения которых иногда отличаются на порядок, вследствие чего возникает необходимость провести предварительную нормализацию всех значений x_i для входного и выходного слоев.

Прогнозирование прочности стенок на основе нейронных сетей предполагало следующий подход. Созданная нейронная сеть в виде многослойного персептрона (MLP) состояла из трех слоев: входного,



включающего 7 указанных выше независимых переменных x_1-x_7 , скрытого, число нейронов в котором варьировалось от 1 до 20, и выходного – 1 зависимой переменной QANN. Проценты обучающей, тестовой и контрольной партий составляли 70, 15 и 15 соответственно. Функции

активации нейронов входного и выходного слоя приведены на рисунке 1. Из набора полученных нейронных сетей MLP 7-12-1 имеет наименьшую ошибку обучения контрольной партии и минимально возможные ошибки обучения тестовой и обучающей выборки (рисунок 2).

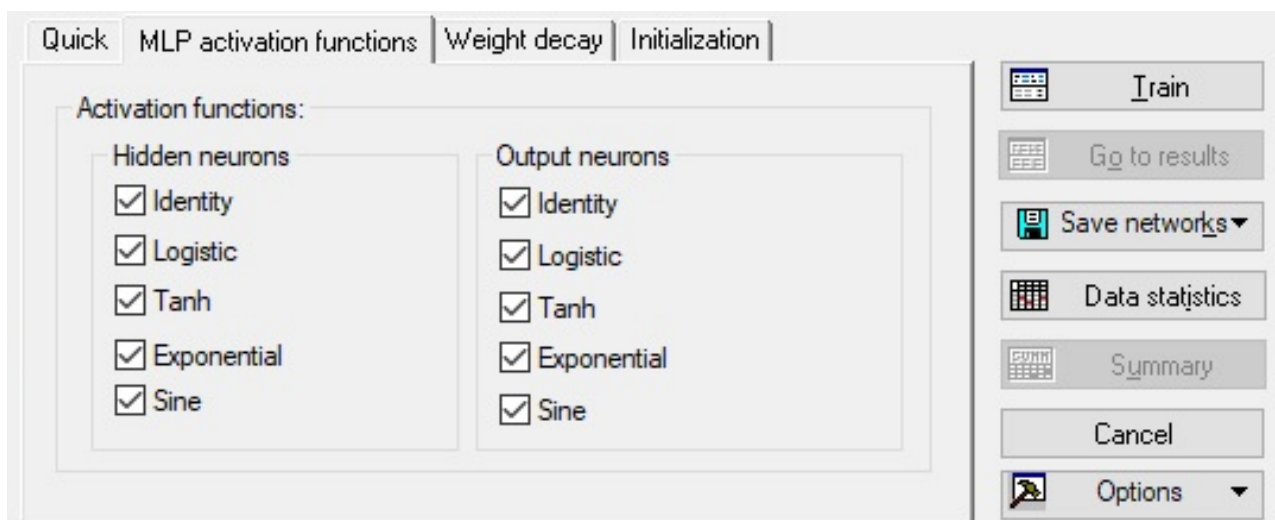


Рисунок 1. Набор функций активации скрытого и выходного слоя нейронов

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
MLP 7-16-1	0,998099	0,877666	0,997313	0,002515	0,001357	0,001338	BFGS 19	SOS	Logistic	Identity
MLP 7-7-1	0,997687	0,837459	0,999344	0,002878	0,000353	0,001960	BFGS 25	SOS	Logistic	Logistic
MLP 7-18-1	0,998482	0,636309	0,998872	0,002084	0,000640	0,024125	BFGS 29	SOS	Identity	Logistic
MLP 7-10-1	0,999616	0,966851	0,999508	0,000466	0,000832	0,000576	BFGS 37	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-13-1	0,999333	0,929765	0,999736	0,000834	0,000249	0,000750	BFGS 77	SOS	Logistic	Logistic
MLP 7-13-1	0,999627	0,958458	0,999467	0,000452	0,000089	0,008127	BFGS 24	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-10-1	0,999305	0,920996	0,999906	0,000959	0,000306	0,002465	BFGS 53	SOS	Tanh	Logistic
MLP 7-19-1	0,998468	0,869019	0,997582	0,001860	0,000471	0,001240	BFGS 19	SOS	Logistic	Sine
MLP 7-12-1	0,999429	0,991412	0,999352	0,000696	0,000306	0,000791	BFGS 37	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-13-1	0,998236	0,945701	0,999586	0,002140	0,000130	0,039949	BFGS 18	SOS	Identity	Exponential

Рисунок 2. Характеристики полученных ИНС

Нелинейная регрессионная модель, являющаяся традиционным способом получения зависимости между функцией и независимыми переменными, также создана на базе датасета из 44 образцов (таблица 1). Оценить параметры, оказывающие наибольшее влияние на величину разрушающей нагрузки возможно с использованием величин общей чувствительности нейронной сети. Обоснованность выбора параметров будет подтверждена проверками наличия выбросов, незначимых данных и проведением корреляционного анализа.

Заключительным этапом реализации обоих подходов является создание универсальной методики расчетов на основе когнитивного компьютеринга. Полученная искусственная нейронная сеть и выражение для инженерных расчетов прочности стенки преобразуются в скрипты на языке

Python. Как указывалось выше, этот язык нашел широкое применение и имеет удобный, зачастую интуитивно понятный синтаксис. Приложение разработано на основе кроссплатформенного графического тулकिита Tkinter в сочетании с использованием ряда необходимых функций.

Результаты

Прогнозные значения разрушающей нагрузки, полученные при использовании отобранной нейронной сети на денормализованных данных приведены на рисунке 3.

В таблице также отражена принадлежность образцов к обучающей, тестовой и контрольной партиям соответственно. Затем точность прогноза была подтверждена на 5 образцах (таблица 2, рисунок 4), не входивших в исходный датасет.



Case name	Sample	Q_kN Target	Q_kN - Output 8. MLP 7-12-1	Case name	Sample	Q_kN Target	Q_kN - Output 8. MLP 7-12-1
1	Train	88,700	87,468	23	Test	76,200	74,934
2	Train	68,100	68,513	24	Train	70,500	68,186
3	Train	81,800	79,464	25	Train	42,700	40,556
4	Train	52,100	53,321	26	Train	47,100	44,330
5	Validation	48,900	51,365	27	Train	51,200	53,305
6	Train	61,900	65,950	28	Train	48,100	48,354
7	Validation	59,600	62,454	29	Validation	50,300	52,969
8	Test	62,900	62,551	30	Test	55,400	57,230
9	Train	78,100	76,975	31	Train	48,700	46,123
10	Train	82,700	82,616	32	Train	42,800	41,839
11	Train	84,100	84,695	33	Test	46,300	50,399
12	Train	120,000	124,304	34	Validation	56,200	61,779
13	Train	225,000	233,790	35	Train	65,100	61,317
14	Train	210,000	207,647	36	Validation	74,500	72,675
15	Train	165,000	162,470	37	Train	62,500	63,886
16	Train	800,000	800,580	38	Validation	453,100	463,750
17	Train	1160,000	1152,289	39	Train	369,100	367,780
18	Test	54,900	57,601	40	Train	416,000	417,635
19	Train	57,600	60,577	41	Train	102,500	98,934
20	Train	77,400	75,959	42	Train	95,000	92,714
21	Train	61,700	59,969	43	Train	106,900	109,060
22	Test	62,100	64,631	44	Train	114,900	114,550

Рисунок 3. Результаты прогнозирования для выбранной ИНС

Cases	8.Q_kN (t)	a_h0	alpha_deg	b_m	ho_m	Rb_MPa	mu_perc	E_MPa
1	57,1245	3,200000	90,00000	30,000000	260,000000	28,20000	0,590000	170,0000
2	72,3169	1,600000	90,00000	30,000000	260,000000	27,50000	1,300000	66,0000
3	69,9632	3,200000	90,00000	30,000000	260,000000	29,70000	1,300000	170,0000
4	374,1251	2,500000	90,00000	74,000000	563,000000	28,40000	1,530000	200,0000
5	123,2482	3,000000	90,00000	50,000000	320,000000	22,20000	1,480000	200,0000

Рисунок 4 – Результаты прогнозирования для дополнительных образцов

Параметрами с наибольшим влиянием на величину разрушающей нагрузки $Q_{reg}(y)$ по данным общей чувствительности нейронной сети (рисунок 5) являются рабочая высота образца h_0 (x_4) и призмная прочность бетона R_b (x_5). Обоснованность использования для построения графика x_4 и x_5 подтверждена проверками наличия

выбросов, незначимых данных и проведением корреляционного анализа (рисунок 6). Тернарный график (рисунок 7) определил вид функции, в наибольшей степени подходящей для нашего уравнения нелинейной регрессии.

h_0	R_b	b	E	α	a/h_0	μ_{sw}
239,2786	27,78572	24,09296	9,019829	2,844891	2,326396	1,606710

Рисунок 5. Степень влияния фактор-аргументов на целевую функцию по результатам анализа общей чувствительности



Variable	Means	Std.Dev.	Q_{ult}	h_0	R_b
Q_{ult}	0,000000	1,000000	1,000000	0,723520	0,447918
h_0	0,000000	1,000000	0,723520	1,000000	0,197461
R_b	-0,000000	1,000000	0,447918	0,197461	1,000000

Рисунок 6. Корреляционная матрица

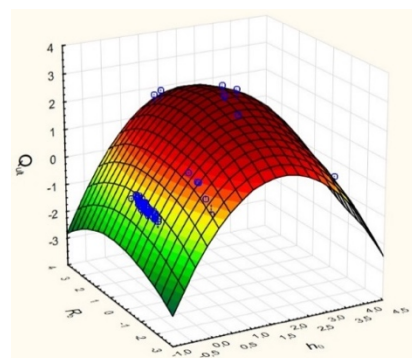


Рисунок 7. Тернарный график

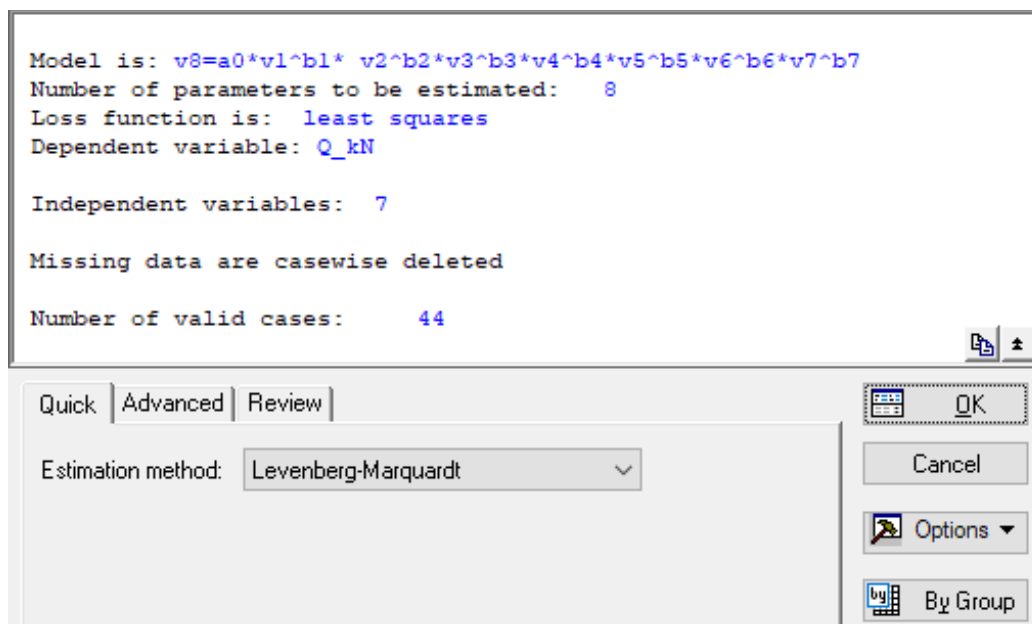


Рисунок 8. Характеристики регрессионной модели

Формула для инженерной методики расчета будет получена на основе степенной функции, уравнение которой имеет следующий вид:

$$y = ax_1^{m_1} x_2^{m_2} x_3^{m_3} x_4^{m_4} x_5^{m_5} x_6^{m_6} x_7^{m_7}, \quad (1)$$

где a – общий коэффициент, m_1 – m_7 – степени независимых переменных.

В модуле STATISTICA Nonlinear Estimation (рисунок 8) находим все неизвестные. Общий коэффициент a и степени независимых переменных m_i вычислены по алгоритму Левенберга-Маркварта. Результат будет следующим:

$$y = 4215,9x_1^{-0,353} x_2^{-0,612} x_3^{1,072} x_4^{1,124} x_5^{0,512} x_6^{-0,019} x_7^{0,481} \quad (2)$$

В соответствии с известным подходом оценки качества регрессионной модели был проведен анализ остатков [33]. Установлено, что их распределение близко к нормальному (рисунок 9), что подтверждает высокую точность полученной зависимости между целевой функцией и фактор-аргументами. На нормальном вероятностном графике остатков регрессии (рисунок 10) видно, что полученные

остатки близки к прямой, соответствующей нормальному закону.

Дисперсионный анализ ANOVA (Analysis of Variance), приведенный на рисунке 11, также подтвердил адекватность полученной нами модели.

Множественные коэффициенты корреляции и детерминации регрессии, приведенные на рисунке 12, указывают на близкую связь между предиктором и откликом.

Несколько упростив полученное ранее выражение (2), запишем его в окончательном виде (3):

$$Q_{reg} = 4200 \frac{b^{1,1} h_0^{1,5} \sqrt{R_b E}}{a^{0,4} \alpha^{0,6} \mu_w^{0,1}}. \quad (3)$$

В формуле (3) величина пролета среза a и характеристики сечения b и h_0 приняты в метрах, коэффициент поперечного армирования μ_w – в процентах, призменная прочность бетона R_b и значение модуля упругости поперечной арматуры – в МПа, угол наклона хомутов к продольной оси балки α – в градусах.

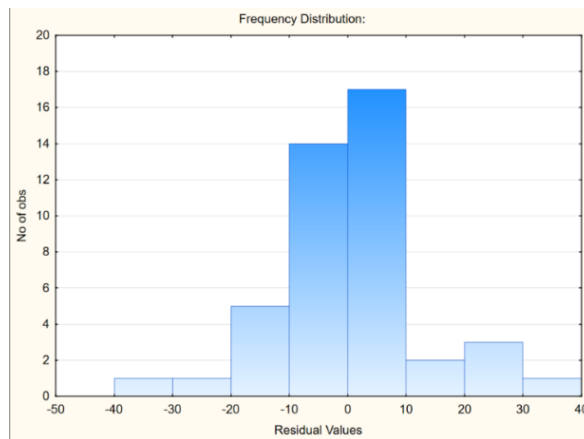


Рисунок 9. Гистограмма распределения остатков регрессии.

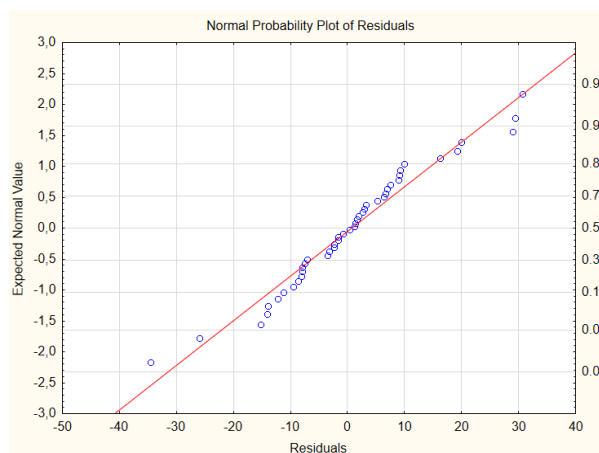


Рисунок 10. График остатков регрессии

Model is: $v_8 = a_0 \cdot v_1^{b_1} \cdot v_2^{b_2} \cdot v_3^{b_3} \cdot v_4^{b_4} \cdot v_5^{b_5} \cdot v_6^{b_6} \cdot v_7^{b_7}$					
Dep. Var. : Q, kN					
Effect	1 Sum of Squares	2 DF	3 Mean Squares	4 F-value	5 p-value
Regression	2797336	8,00000	349667,0	1665,470	0,000000
Residual	7558	36,00000	210,0		
Total	2804894	44,00000			
Corrected Total	1914921	43,00000			
Regression vs. Corrected Total	2797336	8,00000	349667,0	7,852	0,000002

Рисунок 11. Оценка регрессии с помощью ANOVA

```

Model is:  $v_8 = a_0 \cdot v_1^{b_1} \cdot v_2^{b_2} \cdot v_3^{b_3} \cdot v_4^{b_4} \cdot v_5^{b_5} \cdot v_6^{b_6} \cdot v_7^{b_7}$ 
Dependent variable: Q_kN           Independent variables: 7
Loss function: least squares
Final value: 7558,23387482
Proportion of variance accounted for: ,99605298   R = ,99802454
    
```

Рисунок 12 – Статистические показатели регрессии

По двум описанным выше методам разработан алгоритм в виде программного кода на Python. Ниже представлен фрагмент кода и интерфейс созданного десктопного приложения (рисунки 13 и 14). Результатом работы приложения является получение искомой величины разрушающей нагрузки.

На вход поступают параметры, на которых нейронная сеть обучалась в обоих подходах, и далее по одной из выбранных пользователем методик рассчитывается прочность стенки балки. При этом для использования приложения не нужно обладать навыками создания и обучения искусственных нейронных сетей, знанием особенностей их работы.



решением поставленной в настоящей статье задачи и также может быть применен в ряде подобных случаев.

Библиографический список

1. Raschka S., Patterson J., Nolet C. Machine Learning in Python: Main Developments and Technology Trends in Data Science, Machine Learning, and Artificial Intelligence // Information. 2020. No. 11(4):193. DOI: <https://doi.org/10.3390/info11040193>.
2. Ranjan M.K., Barot K., Khairnar V., Rawal A., Pimpalgaonkar A., Saxena S., Sattar A.M. Python: Empowering Data Science Applications and Research // Journal of Operating Systems Development & Trends. 2023. No. 10(1). Pp. 27–33. DOI: 10.37591/JoSDT.
3. Жигулин, В. И. Моделирование застройки произвольной формы с использованием Python в среде 3ds Max / В. И. Жигулин, К. А. Шумилов, А. А. Семенов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 4(38). – С. 113-117. – DOI 10.52684/2312-3702-2021-38-4-113-117. – EDN KZGDNF.
4. Семенов, В. А. Национальная технологическая платформа информационного моделирования. Концепция управления данными и документами / В. А. Семенов, В. А. Золотов, И. В. Рогачев // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2023 года / Под общей редакцией А. А. Семенова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 120-126. – DOI 10.23968/BIMAC.2023.017. – EDN SKAPCU.
5. Римшин, В. И. Применение искусственного интеллекта при обследовании арматуры зданий и сооружений / В. И. Римшин, В. А. Кучеренко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 1(781). – С. 39-46. – DOI 10.32683/0536-1052-2024-781-1-39-46. – EDN EYDGRW.
6. Научные основы искусственного интеллекта в строительстве / В. И. Римшин, И. С. Кузина, А. А. Никитин, А. Е. Молчанова // Русский инженер. – 2023. – № 4(81). – С. 41-45. – EDN FEYPVY.
7. Теория деградации в жизненном цикле зданий и сооружений / В. И. Римшин, А. К. Соловьев, П. А. Амелин, А. А. Никитин // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 5. – EDN IENQTU.
8. Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций / В. И. Римшин, А. К. Соловьев, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 4(23). – С. 101-107. – DOI 10.51608/26867818_2023_4_101. – EDN QMDTVU.
9. Римшин, В. И. Модели поведения бетона. Общая теория деградации / В. И. Римшин, А. А. Варламов. – 2-е издание. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – 439 с. – (Научная мысль). – ISBN 978-5-16-017441-9. – DOI 10.12737/1853676. – EDN HYZTTC.
10. Римшин, В. И. Большой строительный словарь / В. И. Римшин, Е. С. Кецко, П. С. Трунтов ; Российская академия архитектуры и строительных наук. Том 1. – Москва : Издательский дом АСВ, 2022. – 572 с. – EDN AERTFJ.
11. Управление, эксплуатация и обслуживание многоквартирного дома / В. Л. Курбатов, В. И. Римшин, С. В. Волкова, Е. Ю. Шумилова. – Минеральные воды : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – 616 с. – ISBN 978-5-903213-55-9. – EDN ACTPMU.
12. Информационное моделирование в современном строительстве : Цикл лекций / В. Л. Курбатов, В. И. Римшин, С. В. Волкова [и др.]. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – 322 с. – ISBN 978-5-903213-56-6. – EDN UVRQGE.
13. Telichenko Valery, Rimshin Vladimir, Ketsko Ekaterina. Design and Calculation Solutions for Designing Biological Treatment Facilities on The Pumping Station Example // AIP Conference Proceedings 2497, 020009 (2023) <https://doi.org/10.1063/5.0103519>
14. Римшин, В. И. Этапы технического обследования здания текстильной промышленности / В. И. Римшин, П. С. Трунтов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 1(403). – С. 153-158. – DOI 10.47367/0021-3497_2023_1_153. – EDN GNPPGJ.
15. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement // Materials Science Forum. 2023. 1087. Pp. 163-168. May 2023
16. Радиационные риски на предприятиях текстильной промышленности / В. И. Римшин, А. В. Калайдо, М. Н. Семенова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 4(406). – С. 185-191. – DOI 10.47367/0021-3497_2023_4_185. – EDN GWGFV.
17. Alexey Bulgakov, Jens Otto Wen-der Yu, Vladimir Rimshin and Alexey Shleenko. Structural



- organization of robotic building and mounting complexes // *Journal of Robotics and Mechatronics, Proceedings of the 40th ISARC, Chennai, India*, ISBN 978-0-6458322-0-4, ISSN 2413-58442023, Pp. 208-213
18. V.I. Rimshin, S.I. Roshchina, R.V. Lesovik, M.V. Lukin, A.V. Lukina Prolongation of the life cycle of wooden structures due to the use of joints on aluminum connectors // *Eurasian Chemical Communications*, 6 (2024). Pp.122-132.
 19. Valery, Telichenko, Vladimir, Rimshin., Ekaterina, Ketsko Engineering structures stability against progressive collapse // *E3S Web of Conferences* 410, 02037 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341002037> FORM-2023
 20. Telichenko Valery, Rimshin Vladimir, Kalaido Alexandr., Marya Semenova. Prediction of the Radon Situation in Buildings Constructed Under the Renovation Program // *E3S Web of Conferences* 457, 02041 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345702041>
 21. Lagaros N.D. Artificial Neural Networks Applied in Civil Engineering // *Applied Sciences*. 2023. No. 13(2):1131. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13021131>.
 22. Peng F., Xue Wenyuan and Xue Weichen. Database Evaluation of Shear Strength of Slender Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Members // *ACI Structural Journal*. 2020. No. 117(3). Pp. 273–282. DOI: <http://dx.doi.org/10.14359/51723504>.
 23. Тамов, М. М. Прочность тонких стенок железобетонных балок на приопорных участках с учетом предистории загрузки : специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тамов Мурат Мухамедович. – Краснодар, 2013. – 208 с. – EDN SUVDBV.
 24. Leonhardt F., Walther R. *The Stuttgart shear tests* // Cement and Concrete Association. London. 1964.
 25. Тамов, М. М. Нелинейная конечно-элементная модель для расчета прочности стенки двутавровых балок с композитным поперечным армированием / М. М. Тамов, О. В. Руденко, С. В. Усанов // *Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ"*. – 2023. – № 1. – С. 10-16. – EDN BSBEST.
 26. Rangan B.V. Web Crushing Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Beams // *ACI Structural Journal*. 1991. V. 88 No. 1. Pp. 12-16.
 27. Алиев Г.С. Прочность и трещиностойкость стенок двутавровых железобетонных балок из тяжелого и облегченного бетонов при действии поперечных сил: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1979. 151 с.
 28. Абдуллаев, А. Р. Исследование влияния продольного обжатия на прочность стенки двутавровых железобетонных элементов при действии поперечных сил / А. Р. Абдуллаев, Г. С. Алиев, М. М. Батдалов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2007. – № 2(138). – С. 87-89. – EDN KZQNRD.
 29. Усанов, С. В. Трещиностойкость приопорных зон двутавровых балок с поперечным армированием из базальтокомпозитной арматуры / С. В. Усанов, М. М. Тамов // *Инженерный вестник Дона*. – 2022. – № 4(88). – С. 344-361. – EDN QPCEFP.
 30. Imam A., Anifowose F., Azad A.K. Residual Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams Using an Adaptive Model Based on ANN // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. No. 9(2). Pp. 159–172. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40069-015-0097-4>.
 31. Afrifa R.O., Adom-Asamoah M., Owusu-Ansah E. Artificial neural network model for low strength RC beam shear capacity // *Journal of Science and Technology*. 2012. No. 32(2). Pp. 119–132. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/just.v32i2.13>.
 32. Perera R., Barchin M., Arteaga A., Diego A. Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks // *Composites: Part B*. 2010. No. 41. Pp. 287–298. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.03.003>.
 33. Салин В.Н., Чурилова Э.Ю. Статистический анализ данных цифровой экономики в системе «STATISTICA». - М.: КноРус, 2019. 238 с.

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

Статья поступила в редакцию 15.02.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 15.02.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



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_2024_1_53

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ БУТИЛКАУЧУКА

© Авторы 2023
SPIN: 3031-5601
ORCID:0000-0001-7308-7707
ResearcherID: R-3414-2016
ScopusID: 57210894504

ТАРАСОВА Ольга Ивановна
старший преподаватель кафедры Строительных конструкций и машин
Вятский государственный университет
(Россия, Киров, e-mail: tarasovaolga63@yandex.ru)

SPIN: 9507-0540
ORCID: 0000-0003-4310-3379
ResearcherID: B-2095-2014
ScopusID: 54409872800

ЮРКИН Юрий Викторович
кандидат технических наук, заведующий кафедрой Строительных
конструкций и машин
Вятский государственный университет
(Россия, Киров, e-mail: yurkin@vyatsu.ru)

SPIN: 6010-7921
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)

ТАРАДАЕВ Николай Васильевич
аспирант, кафедра Прикладной механики
*Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н.П. Огарева*
(Россия, Саранск)

Аннотация. Актуальность заявленной в статье проблемы обусловлена тем, что, несмотря на высокую теоретическую подготовку вопроса о свойствах композиционных материалов на основе полимеров, экспериментальные исследования по влиянию частоты и температуры на динамические механические свойства наполненных композитов на основе бутилкаучука недостаточно изучены. Данная статья направлена на изучение влияния концентрации добавок – модификаторов: индустриальное масло (МИ), смола (АФФС) и битума (БН 90/10) на динамические механические свойства приготовленных наполненных мелом смесей на основе бутилкаучука и оценку свойств составов, с использованием методологии поверхности отклика (метод планирования эксперимента). Для оптимизации состава было исследовано влияние фактора на отклик. Найден оптимальный состав вибропоглощающего композиционного материала на основе бутилкаучука (БК) с высокими вибропоглощающими свойствами, что даёт возможность выбрать все компоненты, входящие в состав композита с более оптимальной концентрацией. Исходя из эксплуатационных требований, предъявляемых к таким материалам, эти значения составили: (БК – 77,52 г.; мел – 462,28 г.; масло индустриальное – 61,79 г.; алкилфенолоформальдегидная смола (АФФС) – 37,8 г.; битум – 36 г.) На основании проведённых исследований возможно использование полученных данных для дальнейшего прогнозирования свойств, а также для разработки и получения нового состава композиционных материалов на основе БК.

Ключевые слова: наполненный бутилкаучук; метод планирования эксперимента; прочность; тангенс угла механических потерь; модуль упругости; температура; добавки – модификаторы (смола, масло индустриальное, битум); строительные материалы



Для цитирования: Оптимизация состава вибропоглощающих композиций на основе бутилкаучука / О.И. Тарасова, Ю.В. Юркин, В.В. Авдонин, Н.В. Тарадаев // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 53-60. doi 10.51608/26867818_2024_1_53

Original article

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF VIBRATION-ABSORBING COMPOSITIONS BASED ON BUTYL RUBBER

© The Author(s) 2024

TARASOVA Olga Ivanovna

Senior lecturer at the Department of Building Structures and Machinery
Vyatka State University
(Russia, Kirov, e-mail: tarasovaolga63@yandex.ru)

YURKIN Yuri Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Construction Structures and Machines
Vyatka State University
(Russia, Kirov, e-mail: yurkin@vyatsu.ru)

AVDONIN Valeriy Viktorovich

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

TARADAEV Nikolay Vasilyevich

PhD Candidate
National Research Mordovian Ogarev State University
(Russia, Saransk)

Abstract. The significance of the issue outlined in the article stems from the fact that, despite the extensive theoretical investigation of the properties of polymer-based composites, experimental investigations of the impact of frequency and temperature on the dynamic mechanical properties of butyl rubber-filled composites have not been sufficiently studied. This article is aimed at studying the influence of the concentration of additives-modifiers: industrial oil (MI), resin (AFFS) and bitumen (BN 90/10) on the dynamic mechanical properties of prepared chalk-filled mixtures based on butyl rubber and assessing the properties of the compositions using response surface methodology (experiment planning method). To optimize the composition, the influence of the factor on the response was investigated. The optimal composition of a vibration-absorbing composite material based on butyl rubber (BR) with high vibration-absorbing properties has been found, which makes it possible to select all the components included in the composite with a more optimal concentration. Based on the operational requirements for such materials, these values were: (BC — 77.52 gm; chalk — 462.28 gm; industrial oil — 61.79 gm; alkylphenol-formaldehyde resin (APFR) — 37.8 gm; bitumen — 36 gm) Based on the research carried out, it is possible to use the obtained data for further prediction of properties, as well as for the development and production of a new composition of composite materials based on BC.

Keywords: filled butyl rubber; experimental planning method; strength; mechanical loss tangent; elastic modulus; temperature; additives - modifiers (resin, industrial oil, bitumen); building materials

For citation: Optimization of the composition of vibration-absorbing compositions based on butyl rubber / O.I. Tarasova, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin, N.V. Taradaev // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 53-60 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_53

Введение

В настоящее время отечественные и зарубежные ученые работают над созданием различных композиционных полимерных материалов нового поколения [1-2]. Нас

заинтересовали материалы с вибропоглощающими свойствами [3-4], которые значительную часть механической энергии колебаний переводят в тепло, которое затем рассеивается. Мы отметили, что большинство полимеров проявляют свои



диссипативные свойства в ограниченном диапазоне температур, поэтому такие композиты содержат в своем составе помимо полимерной основы различные виды добавок [5-6]. Анализ научной литературы показал, что сочетание полимеров с добавками-модификаторами позволяет получать материалы с совершенно новыми эксплуатационными (динамическими и прочностными) физико-механическими свойствами [7], которыми можно варьировать в широких пределах в зависимости от типа и концентрации используемых добавок, включаемых в полимерную основу (матрицу).

Применяется специализированный подход к анализу данных для решения различных задач, связанных с аналитическими методами оптимизации состава. Их преимущества в сокращении количества экспериментов, снижении потребности в материалах в период проведения лабораторных работ, а также снижение количества таких работ. Эти методы позволяют развивать математические модели, дают возможность оценить релевантность (существенность, уместность), статистическую значимость изучаемых влияний факторов, а также оценить эффекты взаимодействия между факторами. Многофакторный эксперимент широко используется в научной деятельности и является эффективным средством обработки и планирования экспериментальных исследований [8-10]. Планирование многофакторного эксперимента – это процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Все факторы, формирующие процесс экспериментальных исследований, изменяются одновременно по определенным зависимостям, а конечным результатом проведения многофакторного эксперимента будет математическая модель исследуемой функции [11].

Известно, что проводятся исследования и расчёт оптимизации состава в области разработки слоистых вибропоглощающих материалов. К ним относится вибропоглощающий алюмотермоэластопласт, который состоит из двух наружных листов алюминиевого сплава и внутреннего слоя термоэластопласта. Он предназначен для изготовления демпфирующих шайб и прокладок для крепления панелей интерьера и бортовой электронной аппаратуры с целью снижения вибрации и шума в салоне и кабине пассажирских самолётов [12]. В работе [13] о построении многофакторного эксперимента по определению коэффициента поглощения шума у образца с применением конструкции куба (создание регрессионной модели, имеющей 24 набора входных данных), была проведена оптимизация параметров (плотности, толщины, давления и частоты) образца кенаф-эпоксидной смолы. Влияние этих параметров исследовалось путем независимого изменения

каждого параметра [14]. Были получены действительно убедительные, последовательные и удовлетворительные результаты, а также это привело к уменьшению количества исследовательских экспериментов.

Ранее в работах [15-16] были исследованы закономерности изменения физико-химических свойств полимерных композиционных вибропоглощающих материалов на основе бутилкаучука. Автором Галимзяновой Р. Ю. было показано влияние природы, дисперсности и содержания наполнителей и пластификаторов на вязкостные и деформационно-прочностные свойства демпфирующих материалов на основе бутилкаучука [17-19]. Авторами [20] были рассмотрены общие принципы и особенности получения материалов (герметиков) на основе бутилкаучука, изучена взаимосвязь их состава, структуры и свойств.

Мы пришли к выводу о том, что в работах современных отечественных и зарубежных учёных недостаточно изучено влияние добавок-модификаторов и не исследованы процессы, происходящие в структуре таких материалов. Данная проблема требует проведения исследовательской работы по оптимизации состава, позволяющего направленно получить композиционный материал, обладающий высокими вибропоглощающими свойствами, который применялся бы в строительном комплексе. Для данной отрасли новый материал должен обладать определёнными свойствами: отличной демпфирующей способностью, прочностью и адгезией в широком диапазоне отрицательных и положительных температур.

Наша цель – при минимальном количестве экспериментов произвести расчёты для предсказания свойств материала и для правильного выбора концентрации исходных составляющих, для получения и анализа сведений, позволяющих описать зависимости основных технологических показателей от основных параметров в композиционном материале на основе бутилкаучука.

Материалы и методы исследования

Материалы. Для исследования влияния количества модификаторов на различные свойства композиционного материала в качестве полимерной основы в работе использовали: полимер бутилкаучук марки БК-1675Н (ООО ПКФ «Арсенал Кама», РФ), промышленное масло марки И-40 (МИ) ГОСТ 20799-8820 (Роснефть). В качестве наполнителей использовали: мел технический марки КМ-1 («Геокон», РФ), алкилфенолоформальдегидная смола (АФФС) марки SP-1045 (SI-Group Франция), строительный битум марки БН 90/10 (Уральский битумный завод, РФ). Композиционные составы изготавливали путём смешивания полимера и наполнителя, затем добавляли битум, смолу и промышленное масло в разных соотношениях. Смешение проводилось на лабораторном смесителе

периодического действия с тангенциальными роторами. Температура смещения составляла 80°C, время – 0,5 часа. Всего было принято для исследования восемь промаркированных составов.

Методы.

1. Использовался метод динамического механического анализа (NETZSCH) для определения механических динамических свойств составов – характеристик $tg\delta$ и E' .

2. Использовался метод отслаивания от металла на разрывной машине (Shimadzu) для определения прочностных характеристик.

3. Использовался метод планирования экспериментов типа 2 в кубе (проведение испытаний при различных сочетаниях факторов) согласно ГОСТ 18.001-76, в результате которого, получили максимальную информативность. Такой метод позволяет провести отсеивающий эксперимент при минимальном числе опытов.

Под влиянием трёх факторов: смола, битум, индустриальное масло, введённых в разных концентрациях в композиционный материал на основе БК, менялись динамические механические характеристики исследуемого материала. Используя полученные в результате эксперимента данные требовалось получить идеальный состав, соответствующий заданным требованиям. Существовал фактор (различное процентное содержание вышеперечисленных добавок) и отклик ($tg\delta$, E'' , прочность, диапазона демпфирования, $tg\delta$ при +20°C, температура при $tg\delta$ max) композиционного материала. Исследовалось влияние фактора на отклик. Были собраны данные для построения зависимости (определены пределы варьирования) и произведены нормирование факторов (табл. 1; 2):

Таблица 1. Пределы варьирования

	-	0	+
Смола АФФС	12,6 г	25,2 г	37,8 г
Битум БМ	18 г	27 г	36 г
Масло (И-40)	61,79г	70,52г	79,25г
Неизменяемый состав смеси: БК – 77,52 г; Мел – 462,28 г			

Таблица 2. Нормирование факторов, число факторов $k=3$

Составы	Смола АФФС (x_1)	Битум БМ (x_2)	Масло (И-40) (x_3)
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Если поставить 8 опытов для трёх независимых варьируемых переменных, то будут исчерпаны все

сочетания. По результатам опытов была заполнена матрица планирования $2^3 = 8$.

Результаты и их обсуждение

В расчёте оптимального состава композиционного материала с хорошими демпфирующими свойствами использовался метод планирования эксперимента типа 2 в кубе. Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента (ПФЭ) задавалась координатами вершин куба (рис. 1).

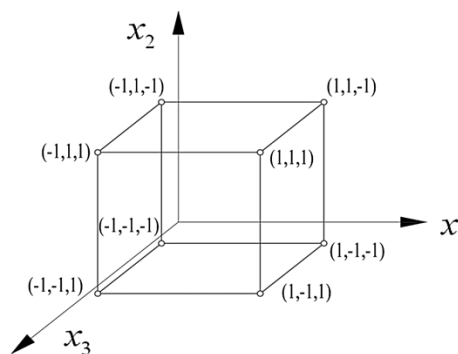


Рис. 1. Координаты вершин куба

Варьируя концентрацию добавок (при смешении композиций) можно было проследить изменения свойств в наполненных системах. Используя полученные в результате эксперимента данные (по диаграммам испытаний композиций, при частоте 1 Гц) были определены характеристики каждого состава, которые представлены в таблице 3. Используя данные и визуализируя полученную информацию (в виде изображения куба) были построены графические зависимости свойств композиций (от состава и полученных характеристик): $tg\delta_{max}$, $tg\delta$ при +20°C, E' , прочность, рабочий диапазон демпфирования, температура при $tg\delta_{max}$ (рис. 2). На основании установленных общих закономерностей, учитывая повышение концентрации смолы, битума и индустриального масла, были выявлены области, где на рис. 2 красным цветом выделены максимальные значения данных параметров.

В результате математической обработки были получены следующие уравнения регрессии:

для максимального тангенса ($tg\delta_{max}$)
 $y = 1,426 - 0,02498x_1 - 0,0090x_2 - 0,00200x_3 + 0,000386x_1x_2 - 0,000034x_1x_3 + 0,000016x_2x_3$

для тангенса при плюс 20 градусах ($tg\delta$ при +20°C)
 $y = 0,135 + 0,01039x_1 + 0,00545x_2 - 0,00029x_3 + 0,000055x_1x_2 - 0,000102x_1x_3 - 0,000048x_2x_3$

для модуля упругости (E')
 $y = 94,49 + 1,7118x_1 - 0,810x_2 - 1,4605x_3 - 0,02315x_1x_2 - 0,00795x_1x_3 + 0,02705x_2x_3$

для прочности при отслаивании от металла
 $y = 18,89 + 0,2186x_1 - 0,2877x_2 - 0,1830x_3 - 0,000573x_1x_2 - 0,001386x_1x_3 + 0,004009x_2x_3$

для рабочего диапазона демпфирования
 $y = 338 - 4,99x_1 - 1,95x_2 - 2,58x_3 + 0,0342 x_1x_2 + 0,0216 x_1x_3 + 0,0239 x_2x_3$

для температуры при $tg\delta_{max}$
 $y = -98,64 + 3,6670x_1 - 0,663x_2 + 0,2005x_3 - 0,00110 x_1x_2 - 0,02386 x_1x_3 + 0,01432 x_2x_3$

Опираясь на исследования и графические построения были установлены общие закономерности: повышение концентрации смолы приводит к уменьшению значения $tg\delta_{max}$, но к увеличению значения $tg\delta$ (при $+20^\circ C$), к увеличению E' , к возрастанию прочности композиции, к уменьшению диапазона демпфирования; повышение концентрации битума ведёт к незначительному изменению значения $tg\delta_{max}$, к увеличению значения $tg\delta$ (при $+20^\circ C$), ведёт к увеличению E' , ведёт к незначительному снижению прочности, но к увеличению диапазона демпфирования; повышение концентрации индустриального масла приводит к снижению прочности и E' , но ведёт к незначительному падению $tg\delta_{max}$ (значит демпфирующая способность композиционного материала остаётся на уровне), уменьшает диапазон демпфирования, но значения $tg\delta$ (при $+20^\circ C$)

уменьшается. Такой многофакторный метод позволяет проводить активный эксперимент с факторами, влияющими на технические характеристики композита. Наибольшая прочность образцов обеспечивается при увеличении содержания смолы (что объясняется возможной физической адсорбцией смолы на поверхности наполнителя), но при этом наблюдается резкое падение значения $tg\delta_{max}$ (снижение основной характеристики демпфирования). Выявлено, что масло индустриальное оказывает хорошее пластифицирующее действие на повышение демпфирующих свойств, обусловленное сродством природы БК и пластификатора по параметрам растворимости (при взаимодействии неполярного БК с неполярным индустриальным маслом самопроизвольно образуется истинный раствор).

Также наибольшее значение $tg\delta_{max}$ наблюдается при меньшей концентрации смолы, соответственно количество смолы следует уменьшить. Для увеличения модуля упругости следует уменьшить количество масла индустриального.

Полученные результаты сведены в таблицу 3.

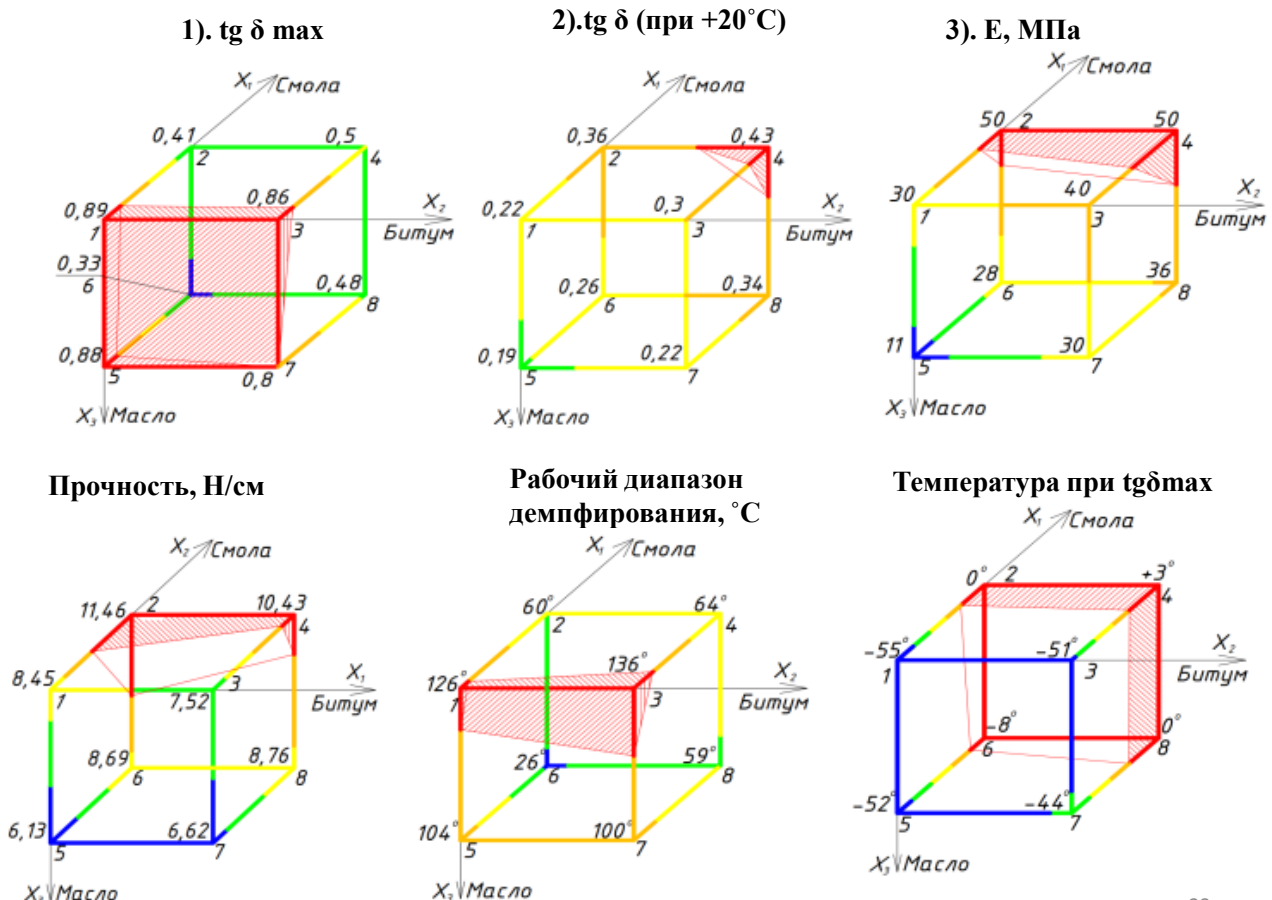


Рис. 2. Графические зависимости композиций от изменения концентрации смолы, битума и масла индустриального



Таблица 3. План эксперимента и сравнение результатов

№	Независимые переменные			Характеристики					
	м а с л о, гр	б и т у м, гр	с м о л а, гр	Экспериментальное значение / Прогнозируемое значение					
				Прочность, Н/см	tgδ max	Температура при tgδ max, °С	Е, МПа	tgδ = при +20°С	Рабочий диапазон демпфирования, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	61,79	18	12,6	$\frac{8,45}{8,41}$	$\frac{0,89}{0,9}$	$\frac{-55,00}{-54,88}$	$\frac{30}{29,88}$	$\frac{0,22}{0,23}$	$\frac{126^{\circ}\text{C}}{\text{от } -118 \text{ до } +8 \text{ } 131,76^{\circ}\text{C}}$
2	61,79	18	37,8	$\frac{11,46}{11,5}$	$\frac{0,41}{0,4}$	$\frac{0}{-0,12}$	$\frac{50}{50,14}$	$\frac{0,36}{0,35}$	$\frac{60^{\circ}\text{C}}{\text{от } -25 \text{ до } +35 \text{ } 55,16^{\circ}\text{C}}$
3	61,79	36	12,6	$\frac{7,52}{7,56}$	$\frac{0,86}{0,85}$	$\frac{-51,00}{-51,14}$	$\frac{40}{40,14}$	$\frac{0,3}{0,28}$	$\frac{136^{\circ}\text{C}}{\text{от } -119 \text{ до } +17 \text{ } 131,0^{\circ}\text{C}}$
4	61,79	36	37,8	$\frac{10,43}{10,39}$	$\frac{0,5}{0,52}$	$\frac{+3,00}{+3,12}$	$\frac{50}{49,89}$	$\frac{0,43}{0,44}$	$\frac{64^{\circ}\text{C}}{\text{от } -29 \text{ до } +35 \text{ } 69,91^{\circ}\text{C}}$
5	79,25	18	12,6	$\frac{6,13}{6,17}$	$\frac{0,88}{0,87}$	$\frac{-52,00}{-52,13}$	$\frac{11}{11,13}$	$\frac{0,19}{0,18}$	$\frac{104^{\circ}\text{C}}{\text{от } -104 \text{ до } 0 \text{ } 98,98^{\circ}\text{C}}$
6	79,25	18	37,8	$\frac{8,69}{8,65}$	$\frac{0,33}{0,34}$	$\frac{-8,00}{-7,87}$	$\frac{28}{27,89}$	$\frac{0,26}{0,27}$	$\frac{26^{\circ}\text{C}}{\text{от } -21 \text{ до } +5 \text{ } 31,88^{\circ}\text{C}}$
7	79,25	36	12,6	$\frac{6,62}{6,58}$	$\frac{0}{0,83}$	$\frac{-44,00}{-43,88}$	$\frac{30}{29,89}$	$\frac{0,22}{0,23}$	$\frac{100^{\circ}\text{C}}{\text{от } -86 \text{ до } +6 \text{ } 105,73^{\circ}\text{C}}$
8	79,25	36	37,8	$\frac{8,76}{8,8}$	$\frac{0,48}{0,47}$	$\frac{0,00}{-0,12}$	$\frac{36}{36,15}$	$\frac{0,34}{0,33}$	$\frac{59^{\circ}\text{C}}{\text{от } -32 \text{ до } +27 \text{ } 54,15^{\circ}\text{C}}$

Примечание к таблице: в графах 5, 6, 7, 8, 9, 10 – верхнее число обозначает экспериментальное значение, нижнее число – прогнозируемое. Сравнивая табличные значения, мы пришли к выводу о том, что модель подтвердила соответствие экспериментальным значениям. Четыре образца с наиболее оптимальным составом (на основании комплекса свойств, удовлетворяющих условиям применения) были отобраны для дальнейших испытаний (образец №1, образец №2, образец №3, образец №4).

Общие выводы

Проведена параметрическая оптимизация состава восьми композиций, которая позволила получить оптимальные значения параметров (модель подтвердила соответствие экспериментальным значениям). Методом планирования многофакторного эксперимента были получены квадратичные уравнения регрессии и построены

графические зависимости, которые позволили адекватно описать изменения основных характеристик (параметров) испытываемых композиций (tgδ, E', прочности, рабочего диапазона демпфирования, tgδ (при +20°С) и температуры при максимальном значении tgδ – от степени наполнения их добавками-модификаторами (смолой, битумом и индустриальным маслом). Установлено, что с целью получения нового композиционного самоклеящегося демпфирующего композиционного материала необходимо учитывать влияние каждого компонента.

Для дальнейших испытаний был выбран оптимальный состав композиции. Образец под № 4, единственный из исследуемых, проходящий почти по всем параметрам (красные зоны), отвечающий комплексу свойств (высокое значение tgδ = 0,43) в интервале рабочих температур для Российских регионов от минус 29 до плюс 35 градусов.

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



Библиографический список

1. Хозин, В. Г. Полимеры в строительстве - реальные границы и перспективы эффективного применения / В. Г. Хозин // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2014. – № 1(1). – С. 9-26. – EDN CMJTVR.
2. Каблов, В. Ф. Проблемы современной технологии полимеров / В. Ф. Каблов ; Министерство науки и высшего образования РФ, Волгоградский гос-ударственный технический университет, Волжский политехнический институт. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2019. – 340 с. – ISBN 978-5-9948-3534-0. – EDN KWFMFAM.
3. Zhao, J. Study on Optimization of Damping Performance and Damping Temperature Range of Silicone Rubber by Polyborosiloxane / J. Zhao, N. Jiang, D. Zhang, B. He, X. Cnen, // Gel. Polymers. – 2020. – № 12(5). – URL: <https://doi.org/10.3390/polym12051196>
4. Разработка композиционных материалов с повышенными вибро-звукопоглощающими свойствами / В. А. Гречишников, И. Ф. Гумеров, М. И. Гумеров [и др.] // СТИН. – 2017. – № 5. – С. 28-34. – EDN ZDRIVP.
5. Черкасов, В. Д. Влияние наполнителей на Физико-механические свойства вибропоглощающих материалов на основе постоянно вязкой мастики / В. Д. Черкасов, В. В. Авдонин, А. А. Пугачёв // Международный Научный Институт «Education». – 2015. – IX (16) – С. 59–64. – ISSN 2413-5348
6. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь / В. А. Сагомонова, В. И. Кислякова, Т. Ю. Тюменова, В. А. Большаков // Труды ВИАМ. – 2015. – № 10. – С. 10. – DOI 10.18577/2307-6046-2015-0-10-10-10. – EDN UMHGZJ.
7. Michalczuk, K. Analysis of the influence of elastomer layer on helical spring stresses in longitudinal resonance vibration conditions / K. Michalczuk // Archives of civil and mechanical engineering – 2013 – Vol.13. – pp.12–26.
8. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий – М.: Наука, 1976. – 139 с.
9. Мухачёв, В. А. Планирование и обработка результатов эксперимента: учеб. - метод. пособие – Томск, 2007 – 118 с.
10. Овчинников, А. А. Оптимизация составов композиционных материалов на основе технологии полиструктурной интеграции гетерогенных материалов / А. А. Овчинников, Д. В. Обручев, И. Н. Данилов // Умные композиты в строительстве. – 2022. – Т. 3, № 1. – С. 30-46. – DOI 10.52957/27821919_2022_1_30. – EDN ENVGUB.
11. Дегтярев, Д. А. Пошаговая методика проведения многофакторного эксперимента. URL: <http://manyfactors.ru>. (дата доступа: 07.01.2019).
12. Новые вибропоглощающие материалы / Ю. В. Сытый, В. А. Сагомонова, В. И. Кислякова, В. А. Большаков // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 2(23). – С. 51-54. – EDN RYXRHL.
13. A. R. A. Aziz and S. A. Aziz 2018 Application of Box Behnken Design to Optimize the Parameters for Kenaf-Epoxy as Noise Absorber International Conference on Materials Engineering and Science. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 454 (2018) 012001.
14. M. Saadatania, G. Ebrahimi, and M. Tajvidi, 2008 “Comparing sound absorption characteristics of acoustic boards made of Aspen particles and different percentage of wheat and barley straws. Proceeding of 17th World Conference on Nondestructive Testing, China.
15. Фокин, А. А. Влияние концентрации карбоната кальция на механические свойства полимерных материалов на основе бутилкаучука / А. А. Фокин, О. И. Тарасова, Ю. В. Юркин // Advanced Science. – 2019. – № 1(12). – С. 73-77. – DOI 10.25730/VSU.0536.19.014. – EDN KQDZCH.
16. Тарасова, О. И. Влияние нескольких видов смол на динамические механические свойства полимерной смеси на основе бутилкаучука / О. И. Тарасова, Ю. В. Юркин, А. С. Торощин // Строительные материалы и изделия. – 2020. – Т. 3, № 2. – С. 36-45. – EDN RMSEIC.
17. Влияние состава на свойства композиций на основе бутилкаучука / Р. Ю. Галимзянова, Т. В. Макаров, Ю. Н. Хакимуллин, С. И. Вольфсон // Вестник Казанского технологического университета. – 2007. – № 2. – С. 53-57. – EDN IJVYLB.
18. 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. – EDN KXIFIF.
19. Влияние технологических добавок на вязкость композиций на основе бутилкаучука / Р. Ю. Галимзянова, Д. Н. Макарова, Т. В. Макаров [и др.] // Каучук и резина. – 2008. – № 2. – С. 20-22. – EDN TAXKGL.
20. Галимзянова, Р. Ю. Неотверждаемые герметизирующие композиции на основе бутилкаучука : специальность 05.17.06 "Технология и переработка полимеров и композитов" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галимзянова Резеда Юсуповна. – Казань, 2008. – 156 с. – EDN NQGWBV.



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

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья

УДК 691-478

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_2024_1_61

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, ОБЛЕГЧЕННЫХ НЕСЪЕМНЫМИ СФЕРИЧЕСКИМИ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЯМИ

© Авторы 2024
SPIN: 6754-0578

ТОШИН Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства
Тольяттинский государственный университет
(Россия, Тольятти, e-mail: D.Toshin@tltsu.ru)

БУЛГАКОВ Максим Евгеньевич

руководитель группы, департамент проектирования
ООО «Полевой» (Россия, Тольятти, e-mail: m.bulgakov@polevoy.pro)

ЖДАНОВ Данила Геннадьевич

инженер
ООО «Реформинг-центр»
(Россия, Тольятти, e-mail: danil.zhdanov.2013@bk.ru)

Аннотация. Облегчение монолитных железобетонных конструкций можно рассматривать как вариант снижения материалоемкости в строительстве без ущерба для прочности и надежности. В статье представлены результаты экспериментально-теоретической оценки несущей способности облегченной железобетонной балки, изготовленной с применением несъемных сферических пустотообразователей. Результаты расчета пустотелого элемента по предельным усилиям и по нелинейной деформационной модели, а также экспериментальные значения несущей способности сравнивались с соответствующими величинами, полученными для классической балки сплошного прямоугольного сечения. В опытно-облегченном образце достигнуто снижение расхода бетона и собственного веса на 23%. Отмечено уменьшение несущей способности облегченной балки в сравнении с эталонным образцом, при этом экспериментальные данные превышают соответствующие расчетные значения. Нелинейная деформационная модель обеспечивает больший запас несущей способности, расчет по предельным усилиям – более экономичные решения при проектировании. Полученные в исследовании данные характерны исключительно для случая пластического разрушения железобетонных балок. Проведенная работа показала возможность изготовления облегченных железобетонных конструкций с применением несъемных сферических пустотообразователей и обеспечения проектного положения вкладышей и арматурного каркаса. Сделаны выводы о допустимости применения нормативных методик расчета к облегченным изгибаемым железобетонным конструкциям.

Ключевые слова: облегченная железобетонная конструкция; изгибаемый железобетонный элемент; пустотообразователь; сферический пустотообразователь; несущая способность; испытание; расчет по предельным усилиям; расчет по нелинейной деформационной модели

Для цитирования: Тошин Д.С., Булгаков М.Е., Жданов Д.Г. Несущая способность железобетонных балок, облегченных несъемными сферическими пустотообразователями // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 61-66. doi 10.51608/26867818_2024_1_61



LOAD-BEARING CAPACITY OF LIGHTWEIGHT REINFORCED CONCRETE BEAMS BY NON-REMOVABLE SPHERICAL VOID GENERATORS

© The Author(s) 2024

TOSHIN Dmitrii Sergeevich

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Center for Architectural, Structural Solutions and Construction Management

Togliatti State University (Russia, Togliatti, e-mail: D.Toshin@tltu.ru)

BULGAKOV Maxim Evgenievich

Head of the Group, Design Department

Limited Liability Company «Polevoy»

(Russia, Togliatti, e-mail: m.bulgakov@polevoy.pro)

ZHDANOV Danila Gennadievich

Engineer

Limited Liability Company «Reforming Center»

(Russia, Togliatti, e-mail: danil.zhdanov.2013@bk.ru)

Abstract. The simplification of monolithic reinforced concrete structures can be considered as an option to reduce the material consumption in construction without compromising strength and reliability. The article presents the results of an experimental and theoretical assessment of the bearing capacity of a lightweight reinforced concrete beam made using non-removable spherical void generators. The results of the calculation of the hollow element according to the limiting forces and the nonlinear deformation model, as well as the experimental values of the bearing capacity, were compared with the corresponding values obtained for the classical beam of a solid rectangular section. In the experimental lightweight sample, a 23% reduction in concrete consumption and its own weight was achieved. A decrease in the load-bearing capacity of the lightweight beam was noted in comparison with the reference sample, while the experimental data exceed the corresponding calculated values. The nonlinear deformation model provides a greater margin of load-bearing capacity, calculation based on marginal forces – more economical design solutions. The data obtained in the study are characteristic exclusively for the case of plastic destruction of reinforced concrete beams. The work carried out has shown the possibility of manufacturing lightweight reinforced concrete structures using non-removable spherical voids and ensuring the design position of the inserts and reinforcement frame. Conclusions are drawn about the permissibility of applying normative calculation methods to lightweight bendable reinforced concrete structures.

Keywords: lightweight reinforced concrete structure; bendable reinforced concrete element; void-forming device; spherical void-forming device; load-bearing capacity; testing, calculation by limiting forces; calculation by nonlinear deformation model

For citation: Toshin D.S., Bulgakov M.E., Zhdanov D.G. Load-bearing capacity of lightweight reinforced concrete beams by non-removable spherical void generators // *Expert: theory and practice*. 2024. № 1 (24). Pp. 61-66 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_61

Введение

С точки зрения рационального использования материалов в изгибаемых железобетонных элементах тавровое сечение является более предпочтительным вариантом в сравнении с прямоугольным. Нормами проектирования предполагается, что при одинаковых габаритных размерах двух вариантов сечений и при условии положения нижней границы сжатой зоны в полке таврового сечения несущие способности в обоих случаях будут равными. Учитывая, что собственный вес бетона достаточно высокий, сокращение его расхода в тавровых сечениях приводит к уменьшению постоянной нагрузки и, как следствие, усилий. Это может поспособствовать сокращению

требуемого армирования непосредственно в изгибаемом элементе и в нижерасположенных конструкциях, например, колоннах, фундаменте.

В сборном железобетоне преимущество облегчения изгибаемых железобетонных элементов используется длительное время и исследование таких конструкций не прекращается [1-8], широко применяются многупустотные и ребристые плиты, при определении несущей способности, которых расчетной формой поперечного сечения принимается тавр. Однако тенденции современного монолитного строительства в преобладающем большинстве случаев предполагают использование в конструкции плит сплошного сечения без удаления части бетона, не влияющей на несущую способность

изгибаемого элемента. В редких случаях применяются конструкции перекрытий и покрытий по профилированному листу [9-11]. Сложившаяся практика назначения сплошных сечений без облегчения монолитных железобетонных конструкций видится весьма расточительной с точки зрения расхода бетона и, как следствие, стальной арматуры.

Как вариант повышения эффективности применения материалов в монолитных и сборно-монолитных железобетонных конструкциях предлагается рассмотреть опытный образец, облегченный несъемными сферическими пустообразователями [12-13].

Методология

Цель работы – теоретическим и экспериментальным путем оценить несущую способность облегченного изгибаемого железобетонного элемента и сравнить с эталонным образцом сплошного сечения. Для этой цели было запроектировано и изготовлено две балки, одинаковые по габаритным размерам и армированию: балка Б1(с) – сплошного сечения, балка Б2(п) – с пустообразователями (рис. 1). По

проекту длина балок 1560 мм (что обеспечивает при испытании расчетный пролет 1500 мм), размеры сечения $b \times h = 150 \times 170$ мм, продольное армирование предусмотрено $2\text{Ø}10$ А500С с проектным значением $a_s = 25$ мм. При конструировании опытных балок предполагался пластический характер разрушения в предельном состоянии (относительная высота сжатой зоны не превышает граничного значения $\xi_s < \xi_R$). При испытании нагрузка на балку прикладывалась в виде двух равных сосредоточенных сил с созданием зоны чистого изгиба в средней трети пролета [14], на данном участке поперечная арматура не устанавливалась.

На исследуемые балки предусматривалась установка трех прогибомеров 6-ПАО для определения прогиба элемента с учетом осадок опор, индикаторов часового типа в паре с удлинителем на базе 300 мм на каждый стержень продольного армирования для фиксации средних деформаций арматуры. Нагрузка на опытные образцы прикладывалась с помощью гидравлического домкрата, ее величина контролировалась динамометром ДОС-5. Расчетная схема балок предполагала шарнирное опирание на опорах.

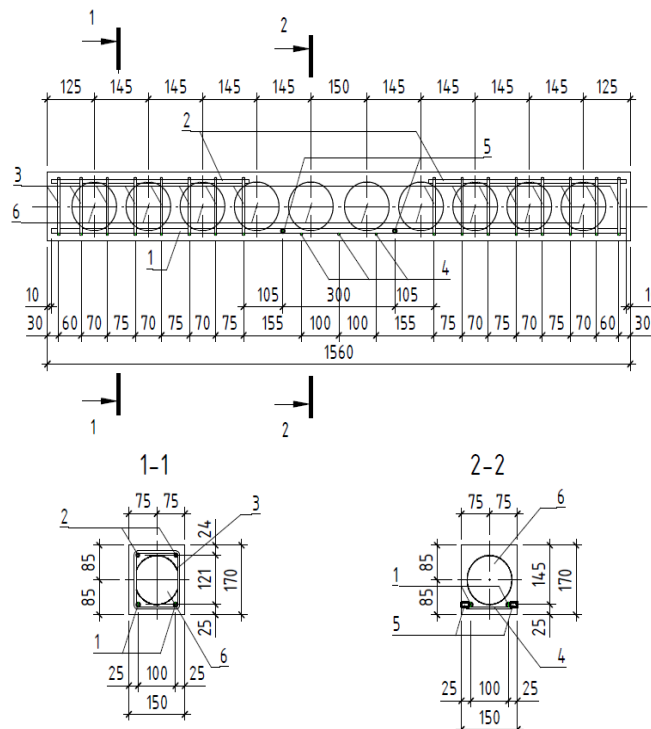


Рисунок 1 – Проектные размеры и схема армирования опытных балок:

1 – продольная рабочая арматура; 2 – продольная монтажная арматура; 3 – поперечная арматура на приопорных участках; 4 – концентраторы напряжений в местах образования трещин в растянутой зоне; 5 – втулки, приваренные к продольной арматуре для крепления измерительных приборов; 6 – пустообразователи (в балке Б1(с) не устанавливались)

При испытании нагрузка увеличивалась степенями, снятие показаний по всем приборам и их фиксация в протокол осуществлялись на каждом шаге нагружения вплоть до разрушения. В

исследовании было принято, что экспериментальное значение несущей способности определяется по величине усилия, при котором средние деформаций



в каждом стержне продольного армирования достигают $250 \cdot 10^{-5}$.

Одновременно с бетонированием опытных балок из того же бетона были изготовлены стандартные кубы $150 \times 150 \times 150$ мм и призмы $600 \times 150 \times 150$ мм. Перед началом испытания балок определялись прочностные и деформативные характеристики бетона: кубиковая прочность 50,2 МПа, призмная прочность 42,5 МПа, начальный модуль упругости $34 \cdot 10^3$ МПа. К моменту испытания стандартных образцов и опытных балок возраст бетона составил более 3 месяцев. Установленные физико-механические показатели бетона превысили проектные значения, прогнозируемый пластический характер разрушения сохранился.

Оценка несущей способности балок проводилась по нормальному сечению с определением предельного изгибающего момента M_{ult} тремя методами: расчетом по предельным усилиям $M_{ult,cal1}$, расчетом по деформационной модели $M_{ult,cal2}$ [15-17], на основании испытаний опытных образцов $M_{ult,exp}$.

Результаты

При расчете по предельным усилиям было установлено, что для балок Б-2(п) высота сжатой зоны не превышает расстояния от верха сферического пустотообразователя для крайнего сжатого волокна, поэтому несущие способности для проектных сечений балок Б-1(с) и Б-2(п) равные. В фактически изготовленных балках имелись некоторые отклонения от проектного положения продольной арматуры, что незначительно сказалось на вычисленных значениях $M_{ult,cal1}$. Для последующего сравнения результатов в сводной таблице (табл. 1) представлены теоретические значения несущей способности при проектном и фактическом положении арматуры.

Таблица 1 – Теоретические и экспериментальные данные о несущей способности балок

Шифр образца-балки	Изгибающий момент M_{ult} , кНм		
	$M_{ult,cal1}$	$M_{ult,cal2}$	$M_{ult,exp}$
При проектных геометрических размерах			
Б1(с)	10,9	10,3	-
Б2(п)	10,9	10,3	-
При фактических геометрических размерах			
Б1(с)	10,7	10,2	12,1
Б2(п)	10,4	9,8	10,5

При расчете нормальных сечений по деформационной модели сечение разбивалось на 10 элементарных участков-полосок, каждая из которых имела размер $b \times 0,1h = 150 \times 17$ мм. Для случая сплошного сечения площадь всех полосок принималась одинаковой. Для облегченного элемента площади участков определялись за вычетом части бетона, вытесненного пустотообразователем. Прочность бетона растянутой зоны не учитывалась. Для бетона сжатой зоны применялся закон деформирования, соответствующий двухлинейной диаграмме $\sigma_b - \varepsilon_b$

[17]. В качестве критерия для определения $M_{ult,cal2}$ принимался факт достижения средними деформациями в арматуре растянутой зоны величины $250 \cdot 10^{-5}$, по аналогии с определением экспериментального значения несущей способности $M_{ult,exp}$.

Обсуждение

Результаты вычислений показывают, что при определении несущей способности рассматриваемых железобетонных образцов по предельным усилиям $M_{ult,cal1}$ и по деформационной модели $M_{ult,cal2}$ получены значения, не достигающие величин $M_{ult,exp}$, установленных экспериментально. При этом данные, вычисленные по предельным усилиям, больше приближены к результатам испытаний. А расчет по деформационной модели, на примере рассматриваемых балок, обеспечивает больший запас несущей способности при проектировании. Вопреки ожиданиям, сформированным на основании предпосылок расчета тавровых сечений, несущая способность балок, изготовленных с применением несъемных сферических пустотообразователей, фактически оказалась на 13% ниже несущей способности аналогичной балки сплошного сечения (без учета собственного веса балок). При этом расчетное расхождение в величине несущей способности для данных балок при фактических геометрических параметрах составляет всего 3-4%. Вычисленная по предельным усилиям несущая способность облегченной железобетонной балки оказалась практически равной несущей способности, установленной экспериментально.

Выводы

1. Запроектирована облегченная конструкция экспериментальной железобетонной балки со сферическими пустотообразователями из пенополистирола. Достигнуто снижение объема бетона, а значит, собственного веса, на 23% в сравнении с эталонной балкой сплошного сечения.
2. Изготовление опытного изгибаемого образца облегченной конструкции доказало жизнеспособность проектной идеи, пустотообразователи удалось разместить в элементе совместно с арматурным каркасом, исключены непровибрированные участки бетона. При проектировании следует уделять особое внимание закреплению легких пустотообразователей для исключения их смещения, всплытия в бетонной смеси.
3. Экспериментальная несущая способность балки с облегчающими вкладышами оказалась ниже несущей способности эталонной балки сплошного сечения на 13%. При этом опытное значение несущей способности превышает расчетные значения, что обеспечивает безопасность проектирования облегченных



конструкций по нормативным методикам, включая расчет по предельным усилиям и расчет по нелинейной деформационной модели.

4. Предельное состояние по несущей способности для опытной балки с пустотообразователями характеризуется пластическим характером разрушения, что согласуется с результатами расчетов.
5. Проведенные исследования показали возможность применения облегчающих пустотообразователей в изгибаемых железобетонных элементах. Экспериментально-теоретическими исследованиями доказано, что конструирование и расчет несущей способности облегченных конструкций возможно выполнять по действующим нормам проектирования.

Библиографический список

1. Аль Каради А. Производство, эффективность и применение многопустотных плит в строительстве // Технологии бетонов. 2014. № 5 (94). С. 32-36.
2. Землянский А. А., Жуков А. Н., Булавина Д. А. Опыт натурного испытания железобетонных ребристых плит // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2019. № 4 (43). С. 79-82. DOI: 10.25628/UNIPR.2019.43.4.014.
3. Босаков С. В., Мордич А. И., Симбиркин В. Н. К повышению несущей способности и жесткости перекрытий, образованных многопустотными плитами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 4. С. 30-36.
4. Коваленко Г. В., Дудина И. В., Назарова Н. О. Оптимизация железобетонных конструкций заводского изготовления на вероятностной основе как фактор снижения их материалоемкости // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т.1. С. 156-160.
5. Кузнецов В. С., Шапошникова Ю. А. Структура стоимости материалов в ребристых плитах при переменной высоте сечения // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3 (87). С. 421-432.
6. Тамразян А. Г., Долганов А. И., Калеев Д. И. и др. К вероятностной оценке надежности железобетонных многопустотных панелей перекрытий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 267-271.
7. Васильев А. С., Назарова В. П. Исследование пустотных железобетонных плит при различных стадиях напряженного состояния // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2019. № 1 (34). С. 9-20.
8. Васильев А. С. Пустотные плиты: расчет по второй группе предельных состояний // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 1 (42). С. 155-163.
9. Применение нормативно-технических документов при проектировании и строительстве зданий и сооружений с использованием ЛСТК и настила армирующего "БИЗОН" / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, Г. В. Мурашкин, А. Н. Сорочайкин. – Тольятти : Автономная Некоммерческая Организация "Институт судебной строительно-технической экспертизы", 2021. – 82 с. – DOI 10.51608/1206572708. – EDN YOYVHXL.
10. Миронов А. Н., Белый Д. В., Анищенков В. М. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонной плиты по профилированному настилу // Металлические конструкции. 2020. Т. 26. № 2. С. 63-75.
11. Виноградова Н. А. Учет стального профиля в расчетах несущей способности сталежелезобетонных балок // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 12. С. 26-33.
12. Тошин Д. С., Долгополов Д. А. Прочность, жесткость и трещиностойкость модели облегченной плитной конструкции со сферическими пустотообразователями // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13. № 1 (50). С. 10-16.
13. Sergiu Călin, Ciprian Asăvoaie, N. Florea. Issues for Achieving an Experimental Model Concerning Bubble Deck Concrete Slab with Spherical Gaps // Gheorghe Asachi” Technical University of Iași Department of Concrete Structures, Building Materials, Technology and Management. 2016. 8 s.
14. Ерышев В. А., Колганов Ю. А., Горшенина Е. В. Установка для испытания балочных конструкций / Патент на изобретение RU2262698 C1, 20.10.2005, Заявка №2004120086/28 от 01.07.2004.
15. Краковский М. Б., Тихонов И. Н. Особенности расчетов нормальных сечений железобетонных конструкций по СП 63.13330.2018 // Бетон и железобетон. 2023. № 4 (618). С. 5-11.



16. Тошин Д. С., Анисимова М. П. Поиск оптимального способа реализации итерационного приближения при расчете по деформационной модели // Научное обозрение. 2016. №17. С. 25-29.
17. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 [Текст]. – введ. 20.06.2019. – Москва : Минстрой России, 2018. – 143 с.

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

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья
УДК 539.42 + 624.046.2
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.9. Строительная механика
DOI 10.51608/26867818_2024_1_67

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСНОВАНИЯ ИЗ ОРТОТРОПНЫХ СЛОЕВ С УЧЕТОМ ИХ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПСЕВДОНЕОДНОРОДНОСТИ

© Авторы 2024
SPIN: 8966-7812
ORCID 0000-0001-8601-4021
ScopusID: 6507502084
ResearcherID: ABA-7387-2021

ТРЕЩЁВ Александр Анатольевич
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой ССМиК
*Российская академия архитектуры и строительных наук;
Тульский государственный университет
(Россия, Тула, e-mail: taa58@yandex.ru)*

SPIN: 2755-2105
ScopusID: 56341418200
ResearcherID: AAN-5972-2020

ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич
доктор технических наук, доцент кафедры ССМиК
*Тульский государственный университет
(Россия, Тула, e-mail: katranv@yandex.ru)*

SPIN: 4508-7073

БЕССТРАШНОВ Дмитрий Олегович
аспирант, ассистент кафедры ССМиК
*Тульский государственный университет
(Россия, Тула, e-mail: mr.D-Best@yandex.ru)*

Аннотация. В статье рассмотрена задача о нахождении параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) полупространства, состоящего из нескольких слоев различных ортотропных материалов, чьи физико-механические характеристики проявляют существенную зависимость от величины напряжений, под действием равномерно распределенного давления на прямоугольной области жесткого штампа. Для построения вычислительной модели применена конечно-элементная (КЭ) модель, основанная на модификации изопараметрического КЭ в форме тетраэдра, без промежуточных узлов с тремя узловыми степенями свободы. Для описания процесса нелинейного деформирования полупространства используются новые эффективные определяющие соотношения, описывающие механическое поведение ортотропных материалов, построенные в рамках теории нормированных пространств напряжений. Рассчитанные параметры напряженно-деформированного состояния сравнивались с результатами, полученными на основе теорий, предложенных другими известными авторами, а также на основе классической теории, без учета эффектов связанных с разносопротивляемостью. Результатом анализа полученных данных авторами является сравнение используемых теорий и делается вывод о необходимости учета неклассических свойств материалов.

Ключевые слова: структурная ортотропия; слоистое основание; деформационная псевдооднородность; наведенная неоднородность; жесткий штамп; метод конечных элементов; строительная механика

Для цитирования: Трещёв А.А., Теличко В.Г., Бесстрашнов Д.О. Математическая модель основания из ортотропных слоев с учетом их деформационной псевдооднородности // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 67-77. doi 10.51608/26867818_2024_1_67



MATHEMATICAL MODEL OF THE FOUNDATION FROM ORTHOTROPIC LAYERS CONSIDERING THEIR DEFORMATIONAL PSEUDONHOMOGENEITY

© The Author(s) 2023

TRESHCHEV Alexander AnatolyevichCorresponding 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)***BESSTRASHNOV Dmitry Olegovich**

PhD Candidate

*Tula State University**(Russia, Tula, e-mail: mr.D-Best@yandex.ru)*

Abstract. The article considers the problem of finding the parameters of the stress-strain state (SSS) of a half-space consisting of several layers of various orthotropic materials, whose physical and mechanical characteristics exhibit a significant dependence on the magnitude of stresses, under the influence of uniformly distributed pressure on a rectangular area of a rigid stamp. To build a computational model, a finite element (FE) model was used, based on a modification of an isoparametric FE in the form of a tetrahedron, without intermediate nodes with three nodal degrees of freedom. To describe the process of nonlinear deformation of a half-space, new effective constitutive relations are used that describe the mechanical behavior of orthotropic materials, constructed within the framework of the theory of normalized stress spaces. The calculated parameters of the stress-strain state were compared with the results obtained on the basis of theories proposed by other well-known authors, as well as on the basis of the classical theory, without taking into account the effects associated with resistance differences. The result of the analysis of the data obtained by the authors is a comparison of the theories used, and a conclusion is drawn about the need to consider the non-classical properties of materials.

Keywords: structural orthotropy; layered foundation; deformation pseudohomogeneity; induced inhomogeneity; rigid punch; finite element method; construction mechanics

For citation: Treshchev A.A., Telichko V.Gr., Besstrashnov D.O. Mathematical model of the foundation from orthotropic layers considering their deformational pseudohomogeneity // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 67-77 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_67

Введение

Ключевой элемент для роста производительности в строительной сфере – это улучшение технологий создания фундаментов и оснований, стоимость которых может достигать до трети всей стоимости объекта строительства. Трудности в инженерно-геологических изысканиях на строительных площадках, сложность самих современных конструкций, условий их эксплуатации, требуют максимально полного и рационального учета реальных физико-механических свойств и особенностей функционирования деформируемых оснований, что может быть обеспечено только с использованием самых последних достижений механики грунтов, строительной механики и вычислительных средств.

Согласно исследованиям авторского коллектива [1-3], анизотропные (ортотропные) породы и грунты достаточно широко распространены, обладают свойством дилатации и чувствительны к характеристикам и виду напряженного состояния [4-7]. Важно отметить, что анизотропия в грунтах (породах) является скорее правилом, чем исключением. Анизотропия (и в частном случае, ортотропия), как правило, ярко выражена в ленточных глинах, лёссе, торфяных и мерзлых почвах, а также в солонцах, скальных породах и некоторых других видах. Анизотропия, вызванная внешними факторами, часто встречается в породах и каменных породах из-за преимущественной ориентации структуры минералов, особенностей текстуры породы



(слоистый, полосатый и т. д.), трещин, дефектов структуры и других факторов.

Традиционные методы моделирования конструкций на упругом основании включают: модель Винклера с одним коэффициентом постели, модель балансировки внешних нагрузок и сопротивления грунта, модель упругого основания по контуру фундаментной плиты с использованием пространственных КЭ, трехмерная модель линейно-деформируемого основания (ЛДО), модель Пастернака с использованием элементов вне контура для учета распределительной способности основания вне контура основания.

Анализ существующих научных работ по математическому моделированию деформируемых оснований показал, что большинство работ в некоторой степени не отражают фактическую работу основания, переполнены гипотезами и допущениями. Наиболее близкими к данным эксперимента и реальной практике являются модели, основанные на применении аппарата трехмерной теории упругости, метода конечных элементов (МКЭ) в сочетании с учетом существенно нелинейного характера работы грунтов [4-5; 8], что делает их более привлекательными по сравнению с моделями ЛДО и подобными им. Кроме того, объемные модели более наглядны при анализе характеристик напряженно-деформированного состояния [9-10].

Особенности механической работы деформируемого основания при расчете и проектировании пространственных конструкций зданий и сооружений можно эффективно учесть только с использованием общей трехмерной теории упругости, используя весь спектр компонентов напряжения и деформации [8]. Поэтому для решения этой задачи необходим новый комплексный обобщенный подход [9]. Вычислительные эксперименты, проведенные исследователями [4-5; 9], указывают на то, что для решения рассматриваемой задачи (моделирование деформируемого основания в многослойном виде) лучше всего подходит изопараметрический тетраэдральный конечный элемент с тремя линейными степенями свободы в узлах [5]. Исходя из этого, авторы разработали новую улучшенную версию КЭ, учитывающую существенно нелинейную работу грунтов и наведенную анизотропию [10-11].

Методология.

Основной задачей проектировщика, который занимается моделированием конструкций и решением сопутствующих задач, является получение массивов числовых значений характеристик напряженно-деформированного состояния реальных конструкций. Решение представленной задачи опирается на широкое разнообразие доступных в настоящее время аналитических, полуаналитических и численных методов. В то же время, следует

отметить, что для анизотропных, в общем случае, материалов с учетом псевдонеоднородности, таких как грунты различной классификации, возможности аналитических методов ограничены крайне узким классом задач. Такие задачи включают в себя простейшие варианты гипотез о распределении параметров НДС в грунтовых основаниях с учетом ограниченного числа значений их механических характеристик [5].

Итак, одной из главных ветвей развития механики в строительстве является применение новых теоретических моделей, создаваемых механикой деформируемого твердого тела в соответствии с экспериментально установленными эффектами, связанными с нестандартными («усложненными») свойствами материалов. Эти модели, как правило, основаны на отклонении от ряда гипотез и приближительных способов описания действительных свойств материала. Осуществление этого вектора развития механики в строительстве увеличивает сложность решаемых задач математического моделирования, вынуждая совершенствовать методы прогнозирования НДС, основанные на современных вычислительной математике и механике, в контексте разработки численных методов, где одним из основных является МКЭ.

Исторически, МКЭ развивался очень быстро, что стало особенно очевидно распространением и развитием вычислительных средства и ресурсов в отраслях. Применение персональных компьютеров и рабочих станций в организациях, занимающиеся исследованиями и проектированием, вызвало множество успешных попыток применить на практике достижения разных прикладных теорий с помощью различных программных комплексов (например, САЕ) [8]. Эти системы в основном используют МКЭ как основной инструмент для моделирования вычислений и проведения численных экспериментов с новыми теоретическими моделями [8].

Построение числовых моделей на основе МКЭ в строительстве и механике грунтов, основано на теоретическом представлении о сплошной среде, континууме как совокупности отдельных элементарных фрагментов – КЭ, которые, несмотря на свой размер, стремящийся к материальной точке, обладают всей полнотой свойств исходной среды. Актуальный опыт исследований показывает, что решение большинства современных задач может быть достигнуто до необходимой точности с использованием новейших достижений в области применения МКЭ.

В современной расчетной практике применяется широкий спектр различных специальных КЭ, ориентированных на решение узкого класса различных специальных задач механики. Среди них отдельно стоит отметить класс КЭ для решения задач прогнозирования НДС конструкций и/или их



элементов, которые позволяют учесть различные дополнительные неклассические физико-механические свойства применяемых материалов. Однако, большинство существующих реализаций числовых моделей основанных на МКЭ, внедренных в распространенное программное обеспечение не позволяет в полной мере реализовать учет так называемых «усложненных» свойств [6-7], поэтому одним из важнейших направлений в развитии современной механики является разработка новых и модификация уже существующих вычислительных методов и математических моделей, применяемых в численном моделировании [8; 10-11].

Постановка задачи исследования.

Очевидно, что здания, обладая фундаментом, совместно функционируют с многослойным деформированным основанием с различными физико-механическими характеристиками в каждом слое. Эти аспекты механической работы оснований тщательно учитываются в актуализированных стандартах проектирования оснований и фундаментов, таких как СП22.13330.2016, а также в предыдущих версиях СНиПа.

При этом производятся подобные расчеты основания, предполагая механическую изотропию или неоднородность по толщине каждого слоя. Однако, проведенные эксперименты с грунтами часто показывают проявление свойств структурной ортотропии в сочетании с деформационной анизотропией, в каждом слое основания. Обычно эти факторы не учитываются при расчетах оснований, что не всегда является обоснованным.

В связи с этим, авторами, предпринята попытка разработки математической модели деформирования слоистого основания, учитывающей структурную ортотропию всех слоев и их деформационную анизотропию при нагружении недеформируемым штампом, который эмулирует собой жесткую подошву массивного фундамента. Деформационная анизотропия представлена как широкоизвестный факт зависимости свойств грунтов от вида НДС [3].

Для формулировки уравнений состояния ортотропной деформационно-неоднородной среды слоев используется модель, сформулированная в нормированном пространстве напряжений, связанном с главными осями ортотропии и основанная на потенциале деформаций [12].

$$e_{ii} = C_{iii} \sigma_{ii} + C_{ijj} \sigma_{jj} + C_{ikk} \sigma_{kk}; \quad \gamma_{ij} = C_{ijj} \tau_{ij} \text{ при } i \neq j \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} C_{iii} &= A_{iii} + B_{iii} \alpha_{ii} + 0,5 [B_{iii} \alpha_{ii} (1 - \alpha_{ii}^2) - B_{jjj} \alpha_{jj}^3 - \\ &- B_{kkk} \alpha_{kk}^3 - B_{ijj} \alpha_{ij}^3 - B_{jkk} \alpha_{jk}^3 - B_{ikk} \alpha_{ik}^3] + B_{ijj} \alpha_{jj} (1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii} \alpha_{jj}) + B_{ijj} \alpha_{kk} (1 - \alpha_{ii}^2 - \alpha_{ii} \alpha_{kk}) - B_{jjk} \alpha_{jj} \alpha_{kk} (\alpha_{jj} + \alpha_{kk}); \\ C_{ijj} &= A_{ijj} + B_{ijj} (\alpha_{ii} + \alpha_{jj}); C_{ikk} = A_{ikk} + B_{ikk} (\alpha_{ii} + \alpha_{kk}); \\ C_{ijj} &= A_{ijj} - (B_{iii} \alpha_{ii}^3 + B_{jjj} \alpha_{jj}^3 + B_{kkk} \alpha_{kk}^3) - 2 [B_{ijj} \alpha_{ii} \alpha_{jj} (\alpha_{ii} + \alpha_{jj}) + B_{jjk} \alpha_{jj} \alpha_{kk} (\alpha_{jj} + \alpha_{kk}) + B_{ikk} \alpha_{ii} \alpha_{kk} (\alpha_{ii} + \alpha_{kk})]; \\ C_{ijk} &= C_{kij}; (i \rightarrow j \rightarrow k = 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); \alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S, \end{aligned}$$

где α_{ij} – нормированные напряжения; σ_{ij} – компоненты напряжений; $S = \sqrt{\sigma_{ij} \sigma_{ij}}$ – норма тензорного пространства; $\alpha_{ij} \alpha_{ij} = 1$ – условие нормировки пространства; A_{ijk}, B_{ijk} – параметры, вычисляемые по результатам обработки экспериментов для ортотропного материала, которые единственным образом определяют тензор податливостей четвертого ранга.

$$\begin{aligned} A_{kkk} &= (1 / E_k^+ + 1 / E_k^-) / 2; B_{kkk} = (1 / E_k^+ - 1 / E_k^-) / 2; \\ A_{ijj} &= -(v_{ij}^+ / E_j^+ + v_{ij}^- / E_j^-) / 2; B_{ijj} = -(v_{ij}^+ / E_j^+ - v_{ij}^- / E_j^-) / 2; \\ A_{ijj} &= 1 / G_{ij}; v_{ij}^+ / E_j^+ = v_{ji}^+ / E_i^+; v_{ij}^- / E_j^- = v_{ji}^- / E_i^-. \end{aligned} \quad (2)$$

где $E_i^\pm, v_{ij}^\pm, G_{ij}$ – модули упругости, коэффициенты поперечной деформации в главных осях ортотропии, модули сдвига в главных плоскостях.

Традиционно основание моделируется как деформируемое полупространство, где единственно определенной является его поверхность, представляющая собой дискретное представление дневной поверхности без учета ограничений среды в трех направлениях. Однако при рассмотрении более сложных физических условий для создания математической модели слоистого основания эффективным является применение МКЭ. В данном

контексте необходимо использовать объемные КЭ. МКЭ оперирует дискретными, четко определенными областями, и, следовательно, модель основания должна точно определить ограничения на размеры. Такие ограничения зависят от размеров областей, где прикладывается нагрузка, и устанавливаются таким образом, чтобы последующие увеличения размеров дискретной области не влияли на результаты расчета. То есть, при достижении стабильности перемещений

и напряжений на всех границах, дальнейшие изменения размеров дискретной области не вносят никакого влияния в полученные результаты.

Рассмотрим задачу о деформировании полупространства, состоящего из ряда слоев грунтовых материалов, как показано на рис. 1 и 2, с размерами, определенными из указанных выше соображений. Нагружение осуществлялось путем приложения равномерно распределенной нагрузки к жесткому штампу. В качестве геометрической модели примем прямую призму, с размерами в плане в десять раз большими соответствующих размеров

зоны давления (рис. 1). При таком соотношении геометрических характеристик модельной задачи, эффективно минимизируется влияние граничных условий на результат прогноза НДС задачи в целом. Исходные данные: длина 20 м, ширина 5 м, толщина 14 м, каждый слой 2 м по высоте сечения, штампа – 2х0,5 м. Физико-механические характеристики материалов приняты в соответствии с исследованиями [4] и сведены в таблицу 1. Интенсивность равномерного давления q принималась от 0 до 700 кПа.

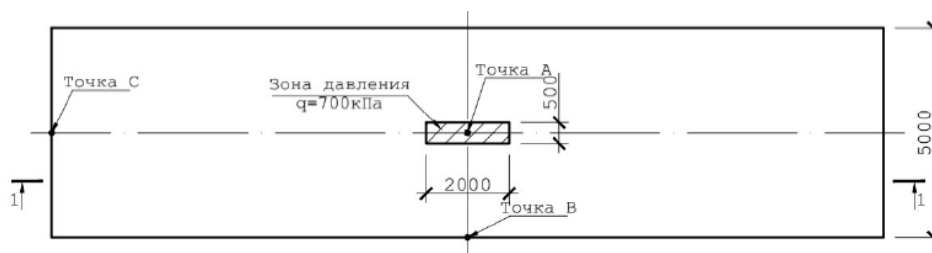


Рис. 1. Вид сверху на исследуемое полупространство

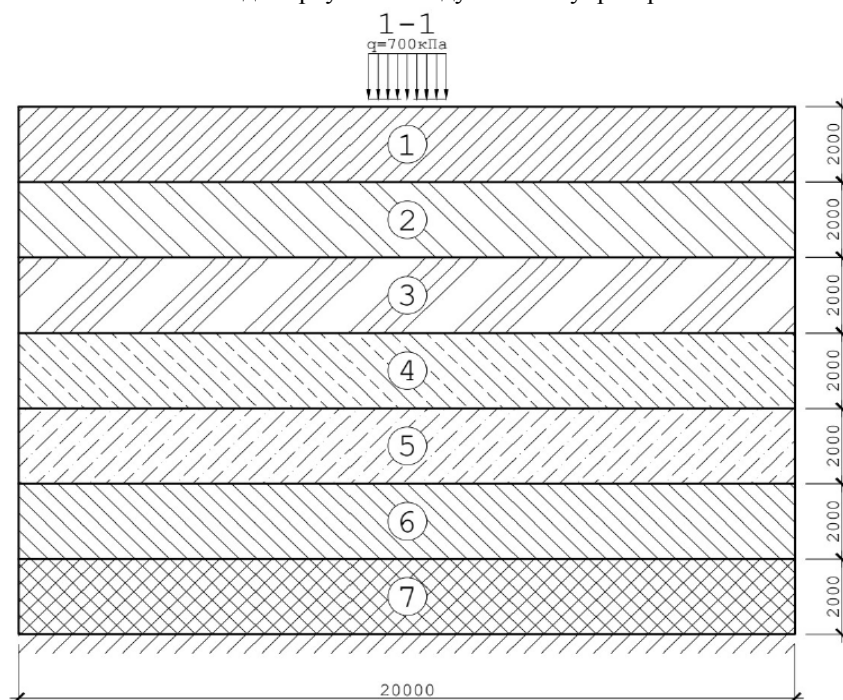


Рис. 2. Деформируемое полупространство (сечение 1-1)

Таблица 1. – Физико-механические характеристики слоев

№ п/п слоя	Модули упругости в МПа, коэффициенты поперечной деформации								
	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
1	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	15,65	31,22	9,97	30,01	9,35	27,45	7,99	7,71	7,11
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	–	–	–
	0,37	0,33	0,38	0,31	0,38	0,31	–	–	–
2	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	13,55	40,65	14,05	42,15	8,55	25,65	10,69	8,34	8,49
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	–	–	–
	0,32	0,24	0,32	0,24	0,32	0,24	–	–	–
3	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	26,67	80	23,65	70,95	20,15	60,45	20,33	18,76	18,26
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	–	–	–
	0,27	0,2	0,27	0,2	0,22	0,17	–	–	–
4	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	5,95	17,85	4,15	12,45	3,45	10,35	3,97	3,62	3,02
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	–	–	–
	0,26	0,22	0,26	0,22	0,255	0,255	–	–	–
5	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	40,15	120,3	30,40	91,30	22,10	66,55	25,57	21,81	18,73
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	–	–	–
	0,415	0,325	0,415	0,325	0,425	0,345	–	–	–
6	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	20,35	60,65	16,85	50,95	16,40	49,20	14,60	14,38	12,55
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	–	–	–
	0,31	0,25	0,31	0,25	0,37	0,29	–	–	–
7	E_1^+	E_1^-	E_2^+	E_2^-	E_3^+	E_3^-	G_{12}	G_{13}	G_{23}
	9,65	28,55	8,85	26,75	6,75	20,95	7,49	6,61	6,01
	ν_{12}^+	ν_{12}^-	ν_{13}^+	ν_{13}^-	ν_{23}^+	ν_{23}^-	–	–	–
	0,24	0,225	0,24	0,225	0,33	0,33	–	–	–

Таким образом, слои полупространства образованы ортотропными структурами, которые чувствительны к виду напряженного состояния. Реализация этой модели ввиду нелинейности уравнений состояния выполнялась методом переменных параметров упругости. В остальном, что, несомненно, является преимуществом, процедура получения замкнутого решения полностью соответствует классической реализации алгоритма МКЭ, для трехмерных КЭ [10], один из которых показан для иллюстрации на рис.3.

Рассмотрим изопараметрический КЭ в виде тетраэдра (рис. 3) без промежуточных узлов [5; 10]

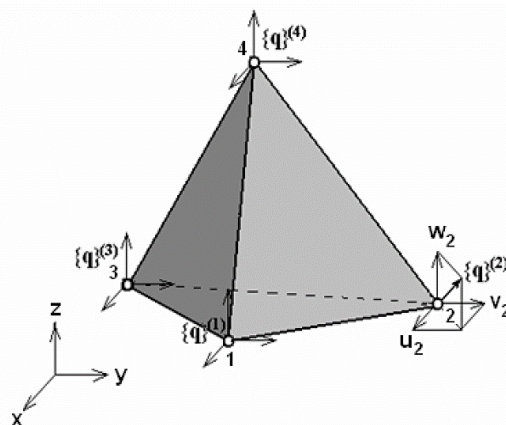


Рис. 3. Используемый КЭ



Вектор узловых перемещений для i -го элемента:

$$\{q\}_i = \left\{ \{q\}_i^{(1)} \{q\}_i^{(2)} \{q\}_i^{(3)} \{q\}_i^{(4)} \right\}, \quad (3)$$

где каждый из векторов q_i представлен тремя проекциями на оси координат

$$\{q\}_i^{(k)} = \{q_1^{(k)} q_2^{(k)} q_3^{(k)}\} = \{u_k v_k w_k\}.$$

Аналогичное представление имеет вектор сопряженных переменных – узловых сил:

$$\{R\}_i = \left\{ \{R\}_i^{(1)} \{R\}_i^{(2)} \{R\}_i^{(3)} \{R\}_i^{(4)} \right\} \quad (4)$$

где $\{R\}_i^{(k)} = \{R_1^{(k)} R_2^{(k)} R_3^{(k)}\}$.

Вектора (3) и (4) связаны между собой посредством выражения $\{R\}_i = [K]_i \{q\}_i$, где матрица жесткости $[K]_i$, имеет блочную структуру, приведенную ниже

$$[K]_i = \begin{bmatrix} [K]_{i1}^{(1)} & [K]_{i1}^{(2)} & [K]_{i1}^{(3)} & [K]_{i1}^{(4)} \\ [K]_{i2}^{(1)} & [K]_{i2}^{(2)} & [K]_{i2}^{(3)} & [K]_{i2}^{(4)} \\ [K]_{i3}^{(1)} & [K]_{i3}^{(2)} & [K]_{i3}^{(3)} & [K]_{i3}^{(4)} \\ [K]_{i4}^{(1)} & [K]_{i4}^{(2)} & [K]_{i4}^{(3)} & [K]_{i4}^{(4)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

блок $[K]_{ij}^{(k)}$ определяется следующим выражением:

$$[K]_{ij}^{(k)} = \iiint_{V_i} ([B]^{(j)})^T [D] [B]^{(k)} dV. \quad (6)$$

Например, $u(x_1, y_1, z_1) = u_1 = \alpha_1 + \alpha_4 x_1 + \alpha_7 y_1 + \alpha_{10} z_1$ и т.д., откуда получаем:

$$\begin{aligned} C_1(x, y, z) + C_2(x, y, z) + C_3(x, y, z) + C_4(x, y, z) &= 1; \\ C_1(x, y, z)x_1 + C_2(x, y, z)x_2 + C_3(x, y, z)x_3 + C_4(x, y, z)x_4 &= x; \\ C_1(x, y, z)y_1 + C_2(x, y, z)y_2 + C_3(x, y, z)y_3 + C_4(x, y, z)y_4 &= y; \\ C_1(x, y, z)z_1 + C_2(x, y, z)z_2 + C_3(x, y, z)z_3 + C_4(x, y, z)z_4 &= z, \end{aligned} \quad (9)$$

после выполнения преобразований

$$\begin{Bmatrix} C_1(x, y, z) \\ C_2(x, y, z) \\ C_3(x, y, z) \\ C_4(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

или:
$$C_1(x, y, z) = \frac{1}{6V_i} (a_1 + b_1 x + c_1 y + d_1 z); \quad C_2(x, y, z) = \frac{1}{6V_i} (a_2 + b_2 x + c_2 y + d_2 z); \quad (11)$$

$$C_3(x, y, z) = \frac{1}{6V_i} (a_3 + b_3 x + c_3 y + d_3 z); \quad C_4(x, y, z) = \frac{1}{6V_i} (a_4 + b_4 x + c_4 y + d_4 z),$$

где $a_1 = \det \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}; \quad b_1 = -\det \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}; \quad c_1 = -\det \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix}; \quad d_1 = -\det \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix},$

а $6V_i = \det \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}.$

Чтобы сформулировать матрицу (6) для элемента, нужно выразить перемещения точек в элементе через перемещения его узлов, то есть установить связь $\{u\} = [C] \{q\}_i = [C]^{(1)} [C]^{(2)} \dots [C]^{(k)} \dots [C]^{(n)} \{q\}_i.$

Матрица интерполяционных функций для тетраэдра состоит из четырех блоков (по числу узлов КЭ)

$$[C] = [C]^{(1)} [C]^{(2)} [C]^{(3)} [C]^{(4)}, \quad (7)$$

где, $[C]^{(k)} = E_3 C_k(x, y, z)$ а E_3 – единичная матрица соответствующего порядка.

Изменение перемещений u, v и w в пределах элемента будут приняты как линейные функции координат, то есть

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= \alpha_1 + \alpha_4 x + \alpha_7 y + \alpha_{10} z; \\ v(x, y, z) &= \alpha_2 + \alpha_5 x + \alpha_8 y + \alpha_{11} z; \\ w(x, y, z) &= \alpha_3 + \alpha_6 x + \alpha_9 y + \alpha_{12} z. \end{aligned} \quad (8)$$

Заметим, что функции из формул (8) гарантируют непрерывность перемещений на границе между элементами. Для нахождения 12 неизвестных коэффициентов, имеется 12 условий (уравнений), равных общему числу степеней свободы в КЭ (4 узла и по 3 перемещения в каждом).



Физический смысл зависимостей (11) сводится к тому, что каждое из выражений представляет собой отношение объема определенного залитого тетраэдра, вершина которого находится в указанной точке, к общему объему КЭ (см. рис. 4), или:

$$C_1(x, y, z) = \frac{V_{m234}}{V_i}, C_2(x, y, z) = \frac{V_{m134}}{V_i}, C_3(x, y, z) = \frac{V_{m124}}{V_i}, C_4(x, y, z) = \frac{V_{m123}}{V_i} \quad (12)$$

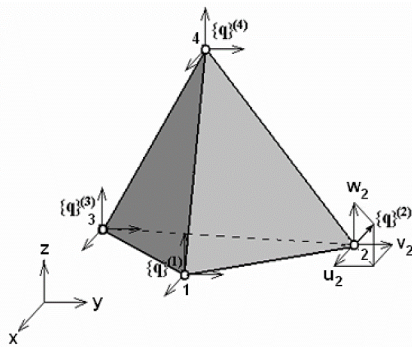
здесь:

$$V_{m234} = \frac{(a_1 + b_1x + c_1y + d_1z)}{6}, V_{m134} = \frac{(a_2 + b_2x + c_2y + d_2z)}{6},$$

$$V_{m124} = \frac{(a_3 + b_3x + c_3y + d_3z)}{6}, V_{m123} = \frac{(a_4 + b_4x + c_4y + d_4z)}{6}.$$

Функции, определенные соотношениями (12) – называются объемными L-координатами (нормализованными координатами для КЭ):

$$L_1 = C_1(x, y, z); L_2 = C_2(x, y, z); L_3 = C_3(x, y, z); L_4 = C_4(x, y, z). \quad (13)$$



Подставив компоненты $[B]^{(k)}$ и матрицу $[D]$ в выражение (6), осуществив интегрирование по объему КЭ, получим выражение для типового блока матрицы жесткости. Так матрица $[B]^{(k)}$ (16) является независимой от координат в глобальной системе, то интеграл (6) эффективно заменяется выражением

$$[K]_{ii}^{(k)} = \frac{1}{36V_i^2} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

здесь:

$$K_{11} = D_{11}b_k b_j + D_{44}c_k c_j + D_{66}d_k d_j + D_{14}(c_k b_j + b_k c_j) + D_{16}(d_k b_j + b_k d_j) + D_{46}(d_k c_j + c_k d_j);$$

$$K_{12} = D_{12}c_k b_j + D_{14}b_k b_j + D_{15}d_k b_j + D_{24}c_k c_j + D_{44}b_k c_j + D_{45}d_k c_j + D_{26}c_k d_j + D_{46}b_k d_j + D_{56}d_k d_j;$$

$$K_{13} = D_{13}d_k b_j + D_{15}c_k b_j + D_{16}b_k b_j + D_{43}d_k c_j + D_{45}c_k c_j + D_{46}b_k c_j + D_{36}d_k d_j + D_{56}c_k d_j + D_{66}b_k d_j;$$

$$K_{21} = D_{12}b_k c_j + D_{24}c_k c_j + D_{26}d_k c_j + D_{14}b_k b_j + D_{44}c_k b_j + D_{46}d_k b_j + D_{15}b_k d_j + D_{45}c_k d_j + D_{56}d_k d_j;$$

$$K_{22} = D_{22}c_k c_j + D_{44}b_k b_j + D_{55}d_k d_j + D_{24}(b_k c_j + c_k b_j) + D_{25}(d_k c_j + c_k d_j) + D_{45}(d_k b_j + b_k d_j);$$

$$K_{23} = D_{23}d_k c_j + D_{25}c_k c_j + D_{26}b_k c_j + D_{34}d_k b_j + D_{45}c_k b_j + D_{46}b_k b_j + D_{35}d_k d_j + D_{55}c_k d_j + D_{56}b_k d_j;$$

$$K_{31} = D_{13}b_k d_j + D_{34}c_k d_j + D_{36}d_k d_j + D_{15}b_k c_j + D_{45}c_k c_j + D_{56}d_k c_j + D_{16}b_k b_j + D_{46}c_k b_j + D_{66}d_k b_j;$$

$$K_{32} = D_{23}c_k d_j + D_{34}b_k d_j + D_{35}d_k d_j + D_{25}c_k c_j + D_{45}b_k c_j + D_{55}d_k c_j + D_{26}c_k b_j + D_{46}b_k b_j + D_{56}d_k b_j;$$

$$K_{33} = D_{33}d_k d_j + D_{55}c_k c_j + D_{66}b_k b_j + D_{35}(c_k d_j + d_k c_j) + D_{36}(b_k d_j + d_k b_j) + D_{56}(b_k c_j + c_k b_j),$$

$j, k = 1, 2, 3.$

Рис. 4. L - координаты [10]

Для выражений (13), справедливо следующее:

$$L_j(x_k, y_k) = \begin{cases} 1, & j = k; \\ 0, & j \neq k. \end{cases} \quad (14)$$

При этом только три из четырех L-координат являются независимыми, так как они связаны выражением:

$$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 1. \quad (15)$$

L-координаты используются для интерполяции узловых перемещений по области КЭ. Блоки матрицы деформаций примут следующий вид:

$$[B]^{(k)} = [\Phi]C_k(x, y, z) = \frac{1}{6V_i} \begin{bmatrix} b_k & 0 & 0 \\ 0 & c_k & 0 \\ 0 & 0 & d_k \\ c_k & b_k & 0 \\ 0 & d_k & c_k \\ d_k & 0 & b_k \end{bmatrix}, \quad (k=1, 2, 3, 4). \quad (16)$$

Матрицу связи напряжений и деформаций, при объемном напряженном состоянии, сформулируем в общем виде для рассматриваемого материала $[D] = [D_{ij}]$ (причем $D_{ij} = D_{ji}$ - свойство симметрии), $i, j=1, \dots, 6$ [9, 12]. При этом примем предположение, что матрица $[D]$ – константа в пределах одного КЭ.

Отметим, что матрица жесткостных характеристик $[D]$, связывающая тензор напряжений с тензором деформаций для ортотропного материала является обратной к тензору податливостей $C_{ijkl} = C_{kmji}$ (1), а именно $[D] = [C_{ijkl}]^{-1}$. Индексация ненулевых компонентов матрицы $[C_{ijkl}]$ соответствуют классической форме ортотропной среды: $C_{1111}, C_{1122}, C_{1133}, C_{2211}, C_{2222}, C_{2233}, C_{3311}, C_{3322}, C_{3333}, C_{1212}, C_{1313}, C_{2323}$. Матрица $[C_{ijkl}]$ для ортотропного материала выглядит следующим образом:

$$[C_{ijkl}] = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{2323} \end{bmatrix}$$

(18)

Результаты моделирования.

В Основные, наиболее характерные, результаты расчетов приведены на рис. 5-8. Так, здесь приводятся графики изменения вертикальных (U_z) и горизонтальных (U_y) перемещений, нормальных напряжений $\sigma_x = \sigma_{11}$ и $\sigma_z = \sigma_{33}$ по вертикали в сечении полупространства 1-1 (см. рис. 1,2). Сравниваются следующие теории описания механического поведения материалов, учтенных в данной работе: усовершенствованные определяющие соотношения [12] (приведены в тексте статьи), расчет без учета свойств разносопротивляемости (с усредненными характеристиками), определяющие соотношения [4; 9] для ортотропных материалов, теории К. В. Берта – Д. Н. Редди [14-15] и С. А. Амбарцумяна – А. А. Хачатряна [13].

При расчете слоистого деформируемого полупространства с применением усовершенствованных соотношений [12] разница составила:

- для вертикальных перемещений: до 5% к определяющим соотношениям [4], до 11,5% к соотношениям С. А. Амбарцумяна – А. А. Хачатряна [13], до 15% к теории К. В. Берта – Д. Н. Редди [14-15] и до 25% при использовании усредненных характеристик материала;
- для горизонтальных перемещений: до 25% к определяющим соотношениям [4], до 36% к соотношениям С. А. Амбарцумяна – А. А. Хачатряна [13], до 81% к теории К. В. Берта – Д. Н. Редди [14-15] и до 118% при

использовании усредненных характеристик материала;

- для нормальных напряжений σ_x : до 2,5% к определяющим соотношениям [4], до 20% к соотношениям С. А. Амбарцумяна – А. А. Хачатряна [13], до 25% к теории К. В. Берта – Д. Н. Редди [14-15] и до 36% при использовании усредненных характеристик материала;
- для нормальных напряжений σ_z : до 5% к определяющим соотношениям [4], до 25% к соотношениям С. А. Амбарцумяна – А. А. Хачатряна [13], до 35% к теории К. В. Берта – Д. Н. Редди [14-15] и до 45% при использовании усредненных характеристик материала.

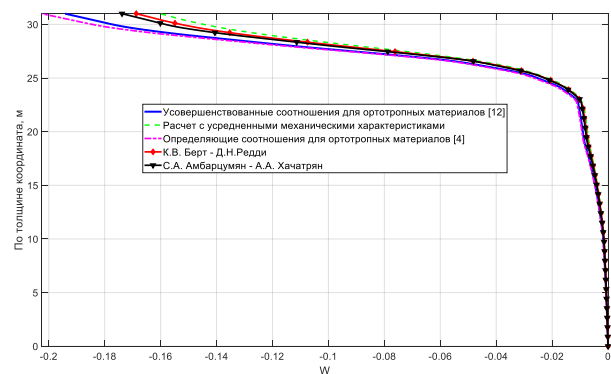


Рис. 5. Изменение вертикальных перемещений по высоте сечения 1-1 в точке А

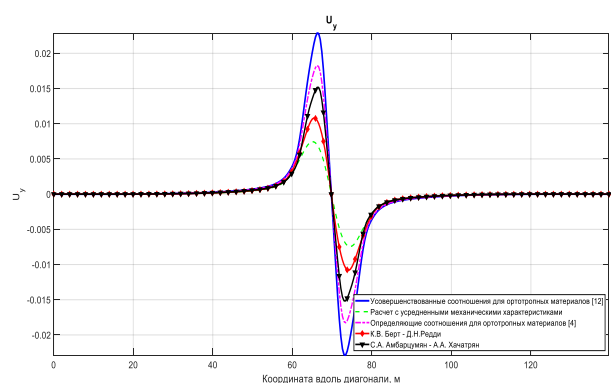


Рис. 6. Изменение горизонтальных перемещений по диагонали вдоль оси симметрии на поверхности полупространства через точку А

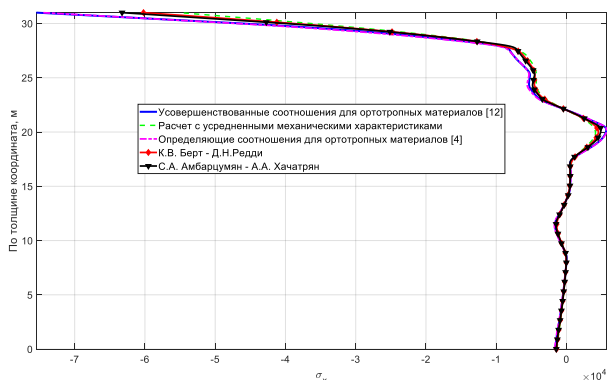


Рис. 7. Изменение нормальных напряжений по высоте сечения 1-1 в точке А

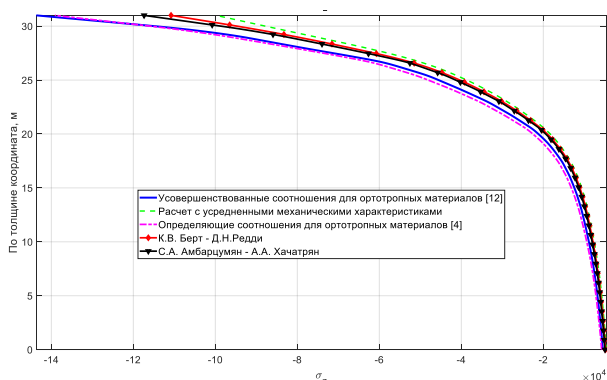


Рис. 8. Изменение напряжений по высоте сечения 1-1 в точке А

Выводы.

Исследования, проведенные авторами в области прогнозирования характеристик НДС модели деформируемого основания, состоящей из ортотропных слоев материала, продемонстрировали преимущества и эффективность предлагаемого подхода, основанного на модифицированных определяющих соотношениях и объемных КЭ [12]. Этот подход обеспечивает высокую точность и удобство практической реализации, что выделяет его среди других существующих подходов [8; 10-11].

Детальные расчеты с применением разработанной модели на основе уравнений состояния [12] (уравнения (1) в представленной работе) подтверждают, что учет двойной анизотропии в слоях основания позволяет обнаружить серьезные недостатки традиционных методов определения параметров его НДС. Следует отметить, что пренебрежение эффектом разносопротивляемости материалов может привести к существенным ошибкам в расчетах параметров НДС слоистой структуры основания.

Кроме того, обнаруживаются хорошее совпадение результатов расчета, полученных с использованием энергетических уравнений [12] с упрощенными [4-7; 9].

Библиографический список

1. Вялов, С. С. Вопросы теории деформируемости связанных грунтов / С.С. Вялов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1966. №3. С. 1-4.
2. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. - М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
3. Бугров, А. К. Анизотропные грунты и основания сооружений. / А. К. Бугров, А. И. Голубев. - СПб.: Недра, 1993. — 245 с.
4. Трещев, А.А., Теличко, В.Г., Ходорович П.Ю. К задаче о давлении на грунтовое основание // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2014. Вып. 18. С. 95-99.
5. Теличко, В. Г. К расчету оснований методом конечных элементов / В. Г. Теличко, П. Ю. Ходорович // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 11-1. – С. 341-346. – EDN TKIVON.
6. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности разносопротивляющихся материалов. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. 359 с.
7. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. 326 с.
8. Семенов, В.А. Выбор расчетных моделей пространственных комбинированных систем МКЭ // Пространственные конструкции зданий и сооружений: Сб. статей. под ред. В.В. Шугаева и др. Издательство: - М. Вып. 9 2004. С. 54–64.
9. Конечно - элементная модель расчета пространственных конструкций из материалов с усложненными свойствами / А. А. Трещев, В. Г. Теличко, А. Н. Царев, П. Ю. Ходорович // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 10. – С. 106-114. – EDN PYQRST.
10. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. / С. Ф. Клованич // Библиотека журнала "Світ геотех-ніки", 9-ый выпуск. – Запорожье: Изд-во журнала "Світ геотехніки", 2009. – 400 с.
11. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals 7th Edition. – Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
12. Трещев, А. А. Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов / А. А. Трещев, Ю. А. Завьялова, М. А. Лапшина // Эксперт: теория и практика. –



2020. – № 3(6). – С. 62-68. – DOI 10.24411/2686-7818-2020-10027. – EDN SWJGCO.
13. Амбарцумян, С. А. Разномодульная теория упругости / С. А. Амбарцумян - М.: Наука, 1982. – 320 с.
14. Reddy L.N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L.N. Reddy, C.W. Bert // ZAMM. 1982. Vol. 62. № 6. P. 213 - 219.
15. Bert C.W. Micromechanics of the different elastic behavior of filamentary composite in tension and compression / C.W. Bert // Mechanics of bimodulus materials. -New York: ASME, 1979. P. 17-28.

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

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья
УДК 674.817-41
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
DOI 10.51608/26867818_2024_1_78

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВП

© Авторы, 2024
SPIN: 9908-4472

ЯРЦЕВ Виктор Петрович

доктор технических наук, профессор, научный руководитель кафедры
«Конструкции зданий и сооружений»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов)

НАЗАРЧУК Андрей Павлович

магистрант
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов)

SPIN: 6026-8270

ДАНИЛОВ Владислав Михайлович

аспирант
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: vm.danilov1997@gmail.com)

Аннотация. В статье представлены результаты натурального экспериментального исследования и последующего анализа воздействия неблагоприятных климатических воздействий на прочностные характеристики ДВП. В данном исследовании в качестве неблагоприятных климатических факторов были выбраны следующие воздействия: попеременное замораживания-оттаивание, ультрафиолетовое облучение и воздействие повышенных температур. В качестве оценочных характеристик прочностных свойств приняты: твердость по Бринеллю и прочность при поперечном изгибе. Актуальность работы заключается в необходимости выявления влияния внешних факторов на свойства древесноволокнистых плит и учета полученных результатов при прогнозировании долговременной прочности. С теоретической точки зрения ценность данной работы заключается в демонстрации методики определения прочностных характеристик древесноволокнистой плиты, подверженной вредным климатическим воздействиям. С практической точки зрения данная работа несет в себе экспериментальные результаты позволяющие судить о прочностных характеристиках ДВП. Доказано, что УФ-облучение и тепловое старение вызывает деструкцию связующего вещества между частицами наполнителя, а влага наносит вред для наполнителя. В итоге, на основании полученных данных было установлено, что не рекомендуется использовать ДВП внутри и снаружи конструкций, которые подвержены неблагоприятному воздействию воды при переходных температурах.

Ключевые слова: древесноволокнистые плиты; замораживание-оттаивание; изгиб; материаловедение; повышенные температуры; прочность; твердость по Бринеллю; ультрафиолетовое воздействие

Для цитирования: Анализ влияния неблагоприятных климатических воздействий на прочностные характеристики ДВП / В.П. Ярцев, А.П. Назарчук, В.М. Данилов // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 78-83. doi 10.51608/26867818_2024_1_78



Original article

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ADVERSE CLIMATIC EFFECTS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF FIBERBOARDS

© The Author(s) 2024

YARCEV Viktor Petrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific head of the
Department of "Structures of Buildings and Structures"
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)

NAZARCHUK Andrey Pavlovich

Master's Degree student
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)

DANILOV Vladislav Mihajlovich

PhD Candidate
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov, e-mail: vm.danilov1997@gmail.com)

Abstract. The article presents the results of a full-scale experimental study and subsequent analysis of the impact of adverse climatic influences on the strength characteristics of fiberboard. In this study, the following exposures were selected as unfavorable climatic factors: alternating freeze-thaw, ultraviolet irradiation and exposure to elevated temperatures. The following are accepted as evaluation characteristics of strength properties: Brinell hardness and transverse bending strength. The relevance of the work lies in the need to identify the influence of external factors on the properties of fiberboards and take into account the results obtained when predicting long-term strength. From a theoretical point of view, the value of this work lies in demonstrating a method for determining the strength characteristics of fiberboard exposed to harmful climatic influences. From a practical point of view, this work contains experimental results that allow us to judge the strength characteristics of fiberboard. It has been proven that UV irradiation and thermal aging cause destruction of the binder between filler particles, and moisture is harmful to the filler. As a result, based on the data obtained, it was determined that it is not recommended to use fiberboard inside and outside structures that are exposed to the adverse effects of water at transition temperatures.

Keywords: fiberboards; freeze-thawing; bending; materials science; elevated temperatures; strength; Brinell hardness; ultraviolet exposure

For citation: Analysis of the influence of adverse climatic effects on the strength characteristics of fiberboards / V.P. Yarcev, A.P. Nazarchuk, V.M. Danilov // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 78-83 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_78

Введение

В настоящее время наблюдается активная замена натуральной древесины ее модернизированными искусственными аналогами – древесными композитами. Причиной этому является как общее развитие научно-технического потенциала, так и экономическое развитие [1]. Древесными композитами принято считать модифицированную полимерами древесину [2]. К таким материалам относится древесноволокнистая плита, которая рассматривается в данной работе.

Неблагоприятные воздействия могут снижать эксплуатационные показатели ДВП. Это может отражаться как на эффективности работы всей конструкции, в составе которой находится древесноволокнистый композит, но и также может

снизить эстетическую привлекательность помещений, что особенно важно при отделке как коммерческих помещений, так как и частных квартир или домов [3-6]. В связи со снижением эксплуатационных показателей ДВП возникает необходимость в регулярных ремонтах, что значительно увеличивает издержки как для частных владельцев, так и для предприятий [7]. Кроме того, нарушение структуры ДВП, входящей в пирог конструкции стены или покрытия может привести к увеличению расходов на отопление [8].

Анализ воздействия неблагоприятных климатических воздействий на прочность и твердость древесноволокнистых плит позволяет выявить поведение материала в процессе эксплуатации, а также выбрать и установить

необходимый температурно-влажностный режим, не приводящий к разрушению материала, что позволит сократить издержки на постоянных ремонтных работах [9-10].

Методология

В качестве объекта исследования выбрана древесноволокнистая плита марки НТ-С, плотностью 600 кг/м³.

Ускоренное старение циклами замораживания-оттаивания в лабораторных условиях включает в себя повторение трех этапов – замачивание образцов до полного водонасыщения в емкости с водой в течение не менее двух часов, замораживание влажных образцов в морозильной камере при отрицательной температуре и оттаивание при комнатной температуре продолжительностью 5, 10, 15, 25, 30 и 35 часов для каждой отдельной партии соответственно [11-12].

Процессы теплового старения моделировались в сушильном шкафу при температуре 80 °С. Для этого партию образцов длиной 115...135 мм, толщиной около 3,3 мм и шириной около 30 мм выдерживали в сушильном шкафу в течении определённого промежутка времени, после чего доставали и охлаждали до комнатной температуры. Каждая последующая партия из шести образцов подвергалась тепловому воздействию на 50 часов дольше. В итоге было испытано 6 партий образцов с продолжительностью 50, 100, 150, 200, 250 и 300 часов соответственно [11; 13].

Воздействие ультрафиолетового облучения моделируется с помощью специальной камеры искусственного фотостарения, оснащенной прямыми ртутно-кварцевыми (ПРК) лампами. Также к данной камере подключен центробежный вентилятор через систему воздушных каналов, в качестве вытяжной вентиляции. Вентиляция необходима для устранения озона, который выделяют лампы, а также для охлаждения этих ламп [11; 14].

В процессе испытаний на поперечный изгиб фиксировалась максимальная разрушающая нагрузка, выдерживаемая материалом. Полученные данные усреднялись [11; 15].

Твердость по Бринеллю определялась по методу невосстановленного отпечатка. За конечный результат твердости принималось среднее арифметическое значение шести образцов [11].

Результаты

Результаты определения разрушающего напряжения при поперечном изгибе древесноволокнистых плит в зависимости от циклов попеременного замораживания-оттаивания представлены на рисунке 1.

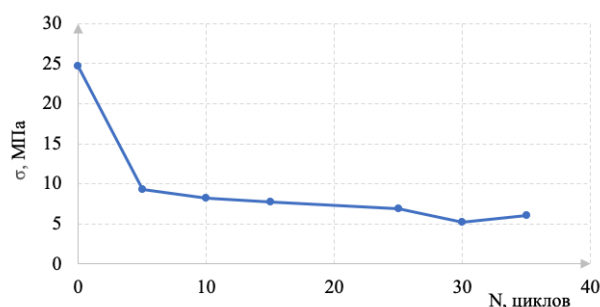


Рисунок 1 – Зависимость прочности от количества циклов попеременного замораживания-оттаивания

Проанализировав график, можно сделать вывод о том, что основное снижение прочности более чем в 2,5 раза наблюдается в первые 5 циклов, после чего значение прочности стабилизируется.

Кроме того, необходимо отметить, что при испытаниях на прочность полное разрушения самого образца не происходило, однако наблюдалось наступление второго предельного состояния, когда появлялись чрезмерные прогибы.

Данные по определению твердости по Бринеллю после воздействия попеременного замораживания-оттаивания представлены на графике в координатах «N (циклов) – НВW (МПа)» на рисунке 2.

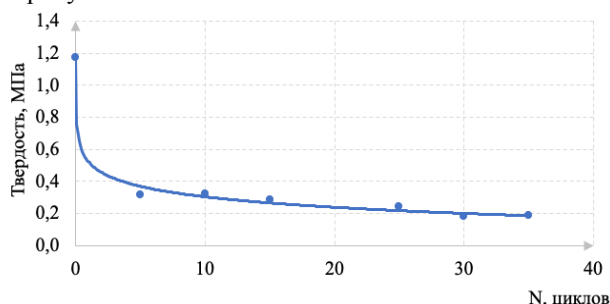


Рисунок 2 – Зависимость твердости по Бринеллю от количества циклов замораживания-оттаивания

Проанализировав график, можно сделать вывод о том, что изменения твердости по Бринеллю по методу невосстановленного отпечатка от количества циклов попеременного замораживания-оттаивания ДВП подчиняются логарифмической зависимости: $НВW = -0,095\ln(N) + 0,5143$.

Результаты определения разрушающего напряжения при поперечном изгибе древесноволокнистых плит в зависимости от продолжительности повышенных температур представлены на рисунке 3.

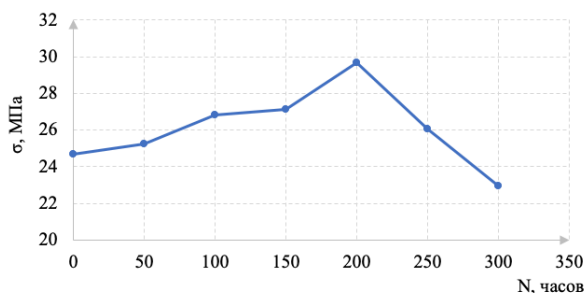


Рисунок 3 – Зависимость прочности от продолжительности теплового старения

Как видно из графика, в первые 200 часов после воздействия повышенных температур на образцы увеличивается прочность материала. Далее, прочность начинает падать, и уже при воздействии более 280 часов ее значение становится ниже первоначального.

Данные по определению твердости по Бринеллю после воздействия повышенных температур представлены на рисунке 4.

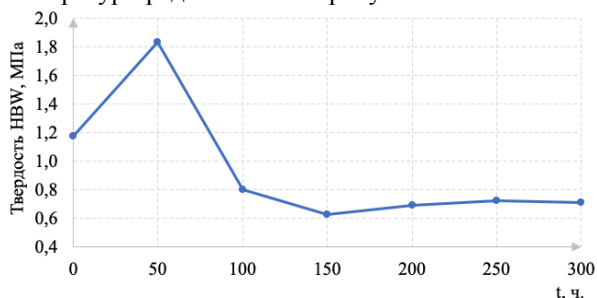


Рисунок 4 – Зависимость твердости по Бринеллю от продолжительности теплового воздействия

Из графика видно, что изменение твердости от продолжительности теплового воздействия в первые 150 часов уменьшается, а далее стабилизируется. Однако, из зависимости выбивается величина твердости при продолжительности воздействия повышенных температур в течении 50 ч.

Результаты определения разрушающего напряжения при поперечном изгибе древесноволокнистых плит в зависимости от продолжительности воздействия ультрафиолетового облучения представлены на рисунке 5.

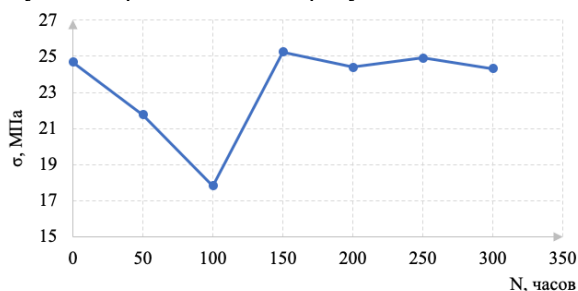


Рисунок 5 – Зависимость прочности от продолжительности воздействия ультрафиолета

Как видно из графика, критичными являются первые 100 часов воздействия ультрафиолета, когда прочность снижается почти в 1,5 раза. Далее значения прочности находятся в пределах исходной величины и практически не изменяются.

Данные по определению твердости по Бринеллю после воздействия ультрафиолетового облучения представлены на рисунке 6.

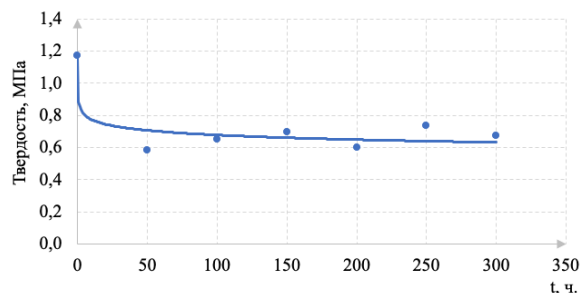


Рисунок 6 – Зависимость твердости по Бринеллю от продолжительности ультрафиолетового воздействия

Из графика видно, что изменение твердости от продолжительности теплового воздействия в первые 50 часов резко снижается и находится на данном уровне независимо от продолжительности воздействия.

Обсуждение

Результаты, полученные в ходе экспериментов на изгиб при замораживании-оттаивании, говорят о том, что прочность материала меняется при самых первых воздействиях попеременного замораживания-оттаивания, а вместе с тем, меняется и его структура. После 30 циклов попеременного замораживания-оттаивания прочность ДВП снижается в 3 раза.

Попеременное замораживание-оттаивание значительно влияет на твердость по Бринеллю древесноволокнистой плиты. Значительное снижение твердости, более чем в 4 раза, наблюдается в первые 5 циклов, после чего значения твердости начинают стабилизироваться. Это говорит о том, что показатель твердости материала меняется при самых первых воздействиях попеременного замораживания-оттаивания, а вместе с тем, меняется и его структура. После 30 циклов попеременного замораживания-оттаивания твердость ДВП снижается в 6 раз.

Изменение прочности на изгиб материала при воздействии повышенных температур можно описать внутренними процессами, связанными со скоростью протекания процессов полимеризации синтетической смолы в составе ДВП и деструкции древесных волокон. В первые 200 часов преобладают процессы, связанные с отверждением смолы. Однако, далее интенсивность процессов затвердевания смолы снижается, и они уже не могут компенсировать разрывы внутренних связей, вызванных разрушением древесных волокон



Нарушение закономерности в первые 50 часов влияния повышенных температур на твердость по Бринеллю, описывается теми же процессами, что приводились ранее – процесс дополимеризации смолы в составе ДВП в первые часы воздействия увеличивает сопротивляемость материала внешним воздействиям до тех пор, пока интенсивность деструкции древесных волокон не начнет превалировать.

Твердость по Бринеллю снижается уже в первые 50 часов воздействия ультрафиолета и далее практически не изменяется. Снижение прочности на изгиб происходит также в первые 50 часов, однако при дальнейшем воздействии ультрафиолета прочность возвращается к исходному значению и практически не изменяется. Это объясняется отрицательным воздействием ультрафиолета на связующее материала, но при этом наполнитель сохраняет свои прочностные характеристики, воспринимая нагрузку неравномерно.

Выводы

Таким образом, на основании полученных данных было установлено, что не рекомендуется использовать ДВП внутри и снаружи конструкций, которые подвержены неблагоприятному воздействию воды при переходных температурах. Применение ДВП в помещениях, в которых возможно кратковременное повышение температур до 80 °С не приведет к деструкции материала, в связи с чем не увеличатся затраты на капитальный ремонт. Однако, постоянное воздействие такой температуры неблагоприятно скажется на структуре материала уже после недели эксплуатации. Кроме того, длительное хранение или эксплуатация конструкций из ДВП без защиты от солнечных лучей не допускается.

Библиографический список

1. Леонович, А. А. Древесноплитные материалы специального назначения / А. А. Леонович. – Изд.: Лань, 2019. – 160 с.
2. Корчаго, И.Г. Применение древесноплитных материалов в строительстве / И. Г. Корчаго. – М.: Стройиздат, 1984. – 94 с.
3. Гусев, Б. В. Изменение линейных размеров минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий / Б. В. Гусев, В. А. Езерский, П. В. Монастырев // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 8. – С. 32-34.
4. Pakhomoova, E., Emelyanov, S., Yartsev, V., Danilov, V., Monastirev, P. The Influence of Climatic Aging on the Performance of Wood-Based Panels // Civil Engineering Journal (Iran) 2023. – Vol. 9(6). – P. 1491–1508
5. Гусев, Б. В. Теплопроводность минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий / Б. В. Гусев, В. А. Езерский, П. В. Монастырев // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 1. – С. 48-49..
6. Дружинина, В.Н. Термическое и световое старение древесноволокнистых плит / В.Н. Дружинина, С.А. Мамонтов, О.А. Киселева // Журнал Academia «Архитектура и строительство». – № 1, 2014. – С. 94-97.
7. Акимов, П. А. Научные исследования и разработки Российской академии архитектуры и строительных наук: состояние, направления и перспективы развития / П. А. Акимов, Е. М. Чернышов, П. В. Монастырев // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : Материалы 4-й Международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета, Тамбов, 15–16 июня 2017 года. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2017. – С. 12-28.
8. Гусев, Б. В. Потеря массы минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий / Б. В. Гусев, В. А. Езерский, П. В. Монастырев // Кровельные и изоляционные материалы. – 2005. – № 2. – С. 48-49.
9. Vakhina, T.N. Plywood and thermal insulation boards based on the modified phenol formaldehyde binder / T.N. Vakhina, A.A. Fedotov, I.V. Susoeva, V.E. Rumyantseva // Lesnoy zhurnal (Russian forestry journal). – 2022. – №1 (385). – С.155-165.
10. Ramesh, P. Environmental Impact of Wood Based Biocomposite Using Life Cycle Assessment Methodology / P. Ramesh, H. Mohit, A. Mozhi Selvan. – Wood Polymer Composites. – 2021. – P.255-268.
11. Ярцев, В.П. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации / В.П. Ярцев, О.А. Киселёва. – Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2009. – 124 с.
12. Мамонтов, С. А. Искусственное и естественное старение древесноволокнистого композита / С. А. Мамонтов, В. П. Ярцев, П. В. Монастырев // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2017. – № 1(367).
13. Антонов, А.В. Поиск оптимальных технологических режимов в производстве трудновоспламеняемых древесноволокнистых плит / А.В. Антонов, Н.А. Петрушева, Ю.Д. Алашкевич, Н.С. Решетова // Химия растительного сырья. – 2016. – № 4. – С.151-157.



14. Чистова, Н.Г. Совершенствование процесса получения древесноволокнистых плит сухим способом / Н. Г. Чистова, В.А. Якимов, Ю.Д. Алашкевич. – Химия растительного сырья. – 2016. – №3. – С.119-124.
15. Pugazhenth N., Anand P. A Review on Preparation of Medium Density Fiberboard with Different Materials // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol.7.

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

Статья поступила в редакцию 22.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 22.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.

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_2024_1_84

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В НЕЛИНЕЙНОДЕФОРМИРУЕМОМ ТЕЛЕ.

Часть 2. ДЕФОРМАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ПРОСТОМ НАГРУЖЕНИИ

© Авторы, 2024

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. Часть 2 статьи посвящена формированию зависимостей между напряжениями и деформациями в нелинейно деформируемом теле. Рассмотрена удельная потенциальная энергия деформации изотропного твердого тела как функция компонентов деформаций или их инвариантов и получены зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейно-упругой среде. Механические свойства материала характеризуются величиной коэффициента объёмного расширения (сжатия) K , функциональной связью октаэдрического касательного напряжения τ_0 и октаэдрического сдвига γ_0 , а также параметром, который определяется разностью коэффициентов Лодэ-Надаи по деформациям μ_ϵ и напряжениям μ_σ . Зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейно упругом теле представлены так же тригонометрическими выражениями. Для случая простого нагружения получены физические соотношения в приращениях, которые можно непосредственно применить для реализации шагового алгоритма в методе конечных элементов. Полученные зависимости между



напряжениями и деформациями в общем виде использованы в третьей части статьи для установления функций используемых при формировании аналитических выражений для параметров пластичности φ и ψ .

Ключевые слова: нелинейно-упругое тело; напряжения; деформации; деформационная теория пластичности; переменные параметры упругости; механика деформируемого твердого тела

Для цитирования: Зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейнодеформируемом теле. Часть 2. Деформационная теория пластичности бетона при простом нагружении / В.М. Круглов, С.В. Бакушев, А.И. Шейн, В.Т. Ерофеев, С.Д.С. Аль Дулайми, А.А. Томилов // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 84-91. doi 10.51608/26867818_2024_1_84

Original article

RELATIONSHIPS BETWEEN STRESSES AND DEFORMATIONS IN A NON-LINEAR DEFORMABLE BODY. Part 2. DEFORMATION THEORY OF CONCRETE PLASTICITY UNDER SIMPLE LOADING

© The Author(s) 2024

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 2 of the article series is devoted to the formation of dependencies between stresses and deformations in a nonlinear-deformable body. The specific potential energy of deformation of isotropic solid as a function of the components of deformations or invariants thereof is considered and dependencies between stresses and deformations in a nonlinear-elastic environment are obtained. The mechanical properties of the material are characterized by the volume expansion coefficient (compression) K , the functional binding of the octahedral tangent voltage τ_0 and the octahedral



shift γ_0 , and the parameter, which is determined by the difference of Lode-Nadai coefficients for strain μ_ε and stress μ_σ . The relationships between stresses and strains in a nonlinear-elastic body are represented by trigonometric expressions. For the case of simple loading, physical ratios in increments are obtained, which can be directly applied to the implementation of the step algorithm in the finite element method. The obtained dependencies between stresses and deformations are generally used in the Part 3 of the article series to determine the functions used in the formation of analytical expressions for plasticity parameters φ and ψ .

Keywords: nonlinear-elastic body; stresses; deformation; deformation theory of plasticity; variable parameters of elasticity; solid deformed body mechanics

For citation: Relationships between stresses and deformations in a non-linear deformable body. Part 2. Deformation theory of concrete plasticity under simple loading / V.M. Kruglov, S.V. Bakushev, A.I. Shein, V.T. Erofeev, S.D.S. Al Dulaimi, A.A. Tomilov // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 84-91 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_84

Введение

Первая часть статьи опубликована ранее [см. 30].

Общими вопросами нелинейной механики деформируемого твердого тела занимались многие исследователи [1-12].

Вопросами экспериментального изучения больших деформаций занимались [13-14].

Учет геометрической нелинейности, как показано в работе [15], «коренным образом меняет многие представления базирующиеся на линейной теории деформации». Так при расчете сплошных массивов [16-18] учет геометрической нелинейности выявляет некоторые особенности процесса деформирования, не имеющие места для геометрически линейных теорий. Учет геометрической нелинейности приводит к тому, что происходит смещение и искажение поверхности прочности [19], затем на диаграммах сдвиговых деформаций при упругопластическом деформировании, площадка текучести заменяется либо возрастающей, либо убывающей кривой.

В литературе предложены различные варианты законов состояния нелинейно-упругой сплошной среды [20 и др.], используемых для решения задач с эффектами, недоступными для линейной теории упругости.

Говоря о совпадении предсказания теории с данными опытов, необходимо отметить, что степень справедливости этого утверждения зависит от допуска, с которым измеряются деформации [21]. Ю. И. Ягн с учениками выполнил поучительную экспериментальную работу [22-23], состоящую в определении критериев пластичности при различных допусках на предельную деформацию, а именно: кроме традиционного допуска 0,2% были рассмотрены допуски 0,01; 0,001%. Оказалось, что при допуске 0,2% граница пластической деформации соответствовала критерию теории течения Мизеса, но при меньших допусках получались гораздо более сложные критерии, изменявшие в пространстве напряжений с увеличением пластических деформаций не только своё положение, но и форму.

Механические свойства деформируемого материала характеризуются величиной модуля объёмного расширения (сжатия) K , функциональной связью октаэдрического касательного напряжения τ_0 и октаэдрической деформации сдвига γ_0 , а также

параметром, который определяется разностью коэффициентов Лодэ-Надаи по деформациям μ_ε и напряжениям μ_σ . На стадиях нагружения, близких к разрушению, значительную роль играет параметр, определяемый разностью μ_σ и μ_ε .

Данная гипотеза основана на том, что для бетона характерно наличие микродефектов до начала нагружения материала. Под действием возрастающей нагрузки микродефекты из хаотически расположенных приобретают определенную ориентацию и затем переходят в микротрещины. Материал в рассматриваемом объеме, имеющий характерную ориентацию микротрещин, приобретает свойства анизотропии. При загрузении выше уровня образования микротрещин, их ориентация определяет развитие деформаций в рассматриваемом объеме материала и приводит к неравенству параметров μ_σ и μ_ε . Следовательно, между векторами τ_0 и γ_0 в девиаторной плоскости будет существовать сдвиг фаз ω , определяемый разностью углов напряжённого ψ_σ и деформированного ψ_ε состояний. По этой причине величину ω следует признать третьим параметром, характеризующим механические свойства материала.

Как отмечалось ранее система уравнений в механике деформируемого твердого тела включает три группы уравнений [24-26]: три уравнения равновесия бесконечно малого объема, шесть уравнений связи между перемещениями и деформациями и шесть уравнений, связывающих напряжения и деформации (основные физические соотношения). Первые девять уравнений являются математически строгими [27]. Ошибка, вызванная линейризацией определяющих (физических) соотношений, возникает при больших перемещениях и поворотах, что не является характерным для большинства строительных конструкций. Использование линейных зависимостей между напряжениями и деформациями вносит наибольшую погрешность в оценку напряженного и деформируемого состояния конструкций, изготовленных из материалов, обладающих свойствами нелинейно деформируемых тел. В этой связи, чем правильнее отражают замыкающие уравнения физический закон, по которому материал сопротивляется различным видам деформаций, тем меньшая погрешность будет допущена в оценке



напряженно-деформированного состояния конструкций.

Зависимости между напряжениями и деформациями

При исследовании прочности бетона [28] определено особое влияние параметра Лоде-Надаи по напряжениям μ_σ , характеризующего вид напряженного состояния материала. Такую же роль будет играть параметр Лоде-Надаи по деформации μ_ϵ , если предельная поверхность строится на основе тензора деформаций.

Зависимости между напряжениями и деформациями, отражающие процесс нагружения, должны строиться так, чтобы предельные величины напряжений, определяемые этими зависимостями, принадлежали предельной поверхности прочного сопротивления. В этом случае параметры μ_σ и μ_ϵ также должны быть включены в такие зависимости.

Рассмотрим один из вариантов построения зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейно-упругом теле в общем виде, который отличается от известного метода В. В. Новожилова [29] и дает ряд новых, необходимых в дальнейшем результатов.

Будем рассматривать удельную потенциальную энергию деформации Π_ϵ изотропного твердого тела как функцию компонентов деформаций или их инвариантов ϵ_0, γ_0 и μ_ϵ :

$$\Pi_\epsilon = \Pi_\epsilon(\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \epsilon_{12}, \epsilon_{21}, \epsilon_{31}) = \Pi_\epsilon(\epsilon_0, \gamma_0, \mu_\epsilon) \quad (2.1)$$

Тогда, компоненты напряженного состояния можно будет выразить соотношениями:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_{ij}}, \quad ij = 11, 12, 13, 22, 23, 33. \quad (2.2)$$

При этом из (2.1) следует

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_0} \frac{\partial \epsilon_0}{\partial \epsilon_{ij}} + \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \gamma_0} \frac{\partial \gamma_0}{\partial \epsilon_{ij}} + \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \mu_\epsilon} \frac{\partial \mu_\epsilon}{\partial \epsilon_{ij}}, \quad ij = 12, 23, 31, 11, 22, 33. \quad (2.3)$$

Вычислим частные производные $\partial \epsilon_0 / \partial \epsilon_{ij}, \partial \gamma_0 / \partial \epsilon_{ij}, \partial \mu_\epsilon / \partial \epsilon_{ij}$, входящие в систему уравнений (2.3):

$$\frac{\partial \epsilon_0}{\partial \epsilon_{ii}} = \frac{1}{3}; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \gamma_0}{\partial \epsilon_{ii}} = \frac{4(\epsilon_{ii} - \epsilon_0)}{3\gamma_0}, \quad ii = 11, 22, 33; \\ \frac{\partial \gamma_0}{\partial \epsilon_{ij}} = \frac{2\epsilon_{ij}}{3\gamma_0}, \quad ij = 12, 23, 31 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \mu_\epsilon}{\partial \epsilon_{ij}} = \frac{\partial \mu_\epsilon}{\partial \psi_\epsilon} \frac{\partial \psi_\epsilon}{\partial \epsilon_{ij}}, \quad (2.6)$$

где производную $\partial \mu_\epsilon / \partial \psi_\epsilon$ с учетом третьего инварианта девиатора деформаций $I_3(D_\epsilon)$ представим следующим образом

$$\frac{\partial \mu_\epsilon}{\partial \psi_\epsilon} = \frac{\sqrt{3}}{\cos^2 \psi_\epsilon}. \quad (2.7)$$

Производные $\partial \psi_\epsilon / \partial \epsilon_{ij}$ получим в виде

$$\frac{\partial \psi_\epsilon}{\partial \epsilon_{ij}} = \frac{1}{9\sqrt{1-\Phi^2}} \frac{\partial \Phi}{\partial \epsilon_{ij}} = \frac{1}{3 \cos 3\psi_\epsilon} \frac{\partial \Phi}{\partial \epsilon_{ij}}, \quad (2.8)$$

$$\text{где } \Phi = \sin 3\psi_\epsilon = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{I_3(D_\epsilon)}{\sqrt{[I_2(D_\epsilon)]^3}}. \quad (2.9)$$

Принимая во внимание, что $I_2(D_\epsilon) = \frac{3}{8}\gamma_0^2$, и подставляя (2.9) в формулы (2.8), получаем

$$\frac{\partial \psi_\epsilon}{\partial \epsilon_{ij}} = \frac{4}{3 \cos 3\psi_\epsilon \gamma_0^2} \left\{ \frac{2\sqrt{2}}{\gamma_0} \frac{\partial I_3(D_\epsilon)}{\partial \epsilon_{ij}} - \sin 3\psi_\epsilon \frac{\partial I_2(D_\epsilon)}{\partial \epsilon_{ij}} \right\}. \quad (2.10)$$

Окончательно соотношение (2.6) представим следующим образом

$$\frac{\partial \mu_\epsilon}{\partial \epsilon_{ij}} = \frac{4}{\sqrt{3} \cos^2 \psi_\epsilon \cos 3\psi_\epsilon \gamma_0^2} \left\{ \frac{2\sqrt{2}}{\gamma_0} \frac{\partial I_3(D_\epsilon)}{\partial \epsilon_{ij}} - \sin 3\psi_\epsilon \frac{\partial I_2(D_\epsilon)}{\partial \epsilon_{ij}} \right\}. \quad (2.11)$$

Частные производные $\partial I_2(D_\epsilon) / \partial \epsilon_{ij}$ и $\partial I_3(D_\epsilon) / \partial \epsilon_{ij}$ определяются путём дифференцирования соответствующих инвариантов по компонентам деформаций.

Подставляя (2.4), (2.5) и (2.11) в формулы (2.3) и учитывая выражения для частных производных $\partial I_2(D_\epsilon) / \partial \epsilon_{ij}$ и $\partial I_3(D_\epsilon) / \partial \epsilon_{ij}$, получим

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ii} &= \frac{1}{3} \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_0} + \frac{4(\epsilon_{ii} - \epsilon_0)}{3\gamma_0} \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \gamma_0} + \frac{4}{\sqrt{3} \cos^2 \psi_\epsilon \cos 3\psi_\epsilon \gamma_0^2} \times \\ &\times \left\{ \frac{2\sqrt{2}}{\gamma_0} \frac{\partial I_3(D_\epsilon)}{\partial \epsilon_{ii}} - \sin 3\psi_\epsilon (\epsilon_{ii} - \epsilon_0) \right\} \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \mu_\epsilon}; \\ \sigma_{ij} &= \frac{2\epsilon_{ij}}{3\gamma_0} \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_0} + \frac{2 \left\{ \frac{\sqrt{2}}{\gamma_0} \frac{\partial I_3(D_\epsilon)}{\partial \epsilon_{ij}} - \sin 3\psi_\epsilon \epsilon_{ij} \right\}}{\sqrt{3} \cos^2 \psi_\epsilon \cos 3\psi_\epsilon \gamma_0^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Индексы в уравнениях (2.12) принимают значения $ii=11, 22, 33; ij=12, 23, 31$.

Уравнения (2.12) в наиболее общем виде характеризуют зависимость между напряжениями и деформациями в нелинейно-упругой среде при малых деформациях. Неизвестные функции $\frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_0}, \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \gamma_0}, \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \mu_\epsilon}$ определяют механические свойства деформируемого материала. Их найдем следующим образом. Соотношения (2.12) запишем в главных осях, то есть перейдем к главным напряжениям и главным деформациям. Тогда удельная энергия деформации будет являться функцией главных деформаций:

$$\Pi_\epsilon = \Pi_\epsilon(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = \Pi_\epsilon(\epsilon_0, \gamma_0, \mu_\epsilon). \quad (2.13)$$

Следовательно,

$$\sigma_i = \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_i} = \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_0} \frac{\partial \epsilon_0}{\partial \epsilon_i} + \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \gamma_0} \frac{\partial \gamma_0}{\partial \epsilon_i} + \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \mu_\epsilon} \frac{\partial \mu_\epsilon}{\partial \epsilon_i}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.14)$$

Решая систему (2.14) относительно неизвестных $\frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \epsilon_0}, \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \gamma_0}, \frac{\partial \Pi_\epsilon}{\partial \mu_\epsilon}$ и учитывая выражения для главных напряжений и деформаций через инварианты $\sigma_0, \tau_0, \mu_\sigma$ и $\epsilon_0, \gamma_0, \mu_\epsilon$, получим



$$\frac{\partial \Pi_\varepsilon}{\partial \varepsilon_0} = 3\sigma_0 = 9K\varepsilon_0; \quad \frac{\partial \Pi_\varepsilon}{\partial \gamma_0} = \frac{3(3 + \mu_\varepsilon \mu_\sigma)}{2\sqrt{3 + \mu_\varepsilon^2 \sqrt{3 + \mu_\varepsilon^2} \sqrt{3 + \mu_\sigma^2} \sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}} \tau_0;$$

$$\frac{\partial \Pi_\varepsilon}{\partial \mu_\varepsilon} = -\frac{(\mu_\varepsilon - \mu_\sigma)(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 \tau_0}{\sqrt{3 + \mu_\varepsilon^2} \sqrt{3 + \mu_\sigma^2} \gamma_0}$$

$$= -\frac{9(\mu_\varepsilon - \mu_\sigma) \tau_0 \gamma_0}{2\sqrt{3 + \mu_\varepsilon^2} \sqrt{3 + \mu_\sigma^2} (3 + \mu_\varepsilon^2)}.$$

(2.15)

С учетом (2.15) уравнения (2.12) окончательно запишем в виде

$$\sigma_{ii} = 3K\varepsilon_0 + 2\frac{\tau_0}{\gamma_0} \left\{ d_1(\varepsilon_{ii} - \varepsilon_0) - 2d_2 \frac{\partial J_3(D_\varepsilon)}{\partial \varepsilon_{ii}} \right\}, \quad ii = 11, 22, 33;$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \left\{ d_1 \varepsilon_{ij} - \frac{d_2}{\cos 3\psi_\varepsilon} 4 \frac{\partial J_3(D_\varepsilon)}{\partial \varepsilon_{ij}} \right\}, \quad ij = 12, 23, 31,$$

(2.16)

где $d_1 = \frac{(3 + \mu_\varepsilon \mu_\sigma) + \sqrt{3(\mu_\varepsilon - \mu_\sigma) \varepsilon_0} \cos 3\psi_\varepsilon}{\sqrt{3 + \mu_\varepsilon^2} \sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}; \quad d_2 = \frac{\sqrt{6}}{\gamma_0} \frac{\mu_\varepsilon - \mu_\sigma}{\sqrt{3 + \mu_\varepsilon^2} \sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}.$

В уравнениях (2.16) механические свойства материала характеризуются величиной коэффициента объемного расширения (сжатия) K , функциональной связью октаэдрического касательного напряжения τ_0 и октаэдрического сдвига γ_0 , а также параметром, который определяется разностью коэффициентов Лодэ-Надаи по деформациям μ_ε и напряжениям μ_σ . При $\mu_\sigma = \mu_\varepsilon$ эти формулы переходят в известные соотношения Надаи-Генки.

Исходя из полученных зависимостей (2.16), можно предположить, что на стадиях, близких к разрушению, фундаментальную роль в определении прочностных свойств бетона играет параметр, определяемый разностью μ_σ и μ_ε . Поясним подробнее эту гипотезу. Многочисленными исследованиями установлено, что для бетона характерно наличие микродефектов до начала нагружения материала. Причем расположение этих дефектов в объеме материала можно считать хаотическим. Под действием постоянно возрастающей внешней нагрузки микродефекты из хаотической расположенности приобретают вполне определенную ориентацию и затем переходят в микротрещины. Направление микротрещин соответствует виду деформированного состояния, характеризующегося параметром μ_ε или углом ψ_ε . Тем самым материал в рассматриваемом объеме, имеющим характерную ориентацию микротрещин, приобретает свойства анизотропии. При загрузении выше уровня образования микротрещин, их ориентация определяет развитие деформаций в рассматриваемом объеме материала и приводит к неравенству μ_σ и μ_ε . Следовательно, между векторами τ_0 и γ_0 в девиаторной плоскости будет существовать сдвиг фаз ω , определяемый разностью углов ψ_σ и ψ_ε :

$$\omega = \psi_\sigma - \psi_\varepsilon. \quad (2.17)$$

Таким образом, величина ω является третьим параметром, характеризующим механические свойства материала.

Зависимости, связывающие, напряжения и деформации в нелинейно-упругом теле (2.16), можно представить в иной форме. Заменяя коэффициенты Лодэ-Надаи μ_σ и μ_ε их тригонометрическими выражениями, получим

$$\sigma_{ii} = \sigma_0 + 2\frac{\tau_0}{\gamma_0} \left\{ \frac{\cos(3\psi_\varepsilon + \omega)}{\cos 3\psi_\varepsilon} (\varepsilon_{ii} - \varepsilon_0) + \frac{2\sqrt{2}}{\gamma_0} \frac{\sin \omega}{\cos 3\psi_\varepsilon} \frac{\partial J_3(D_\varepsilon)}{\partial \varepsilon_{ii}} \right\};$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \left\{ \frac{\cos(3\psi_\varepsilon + \omega)}{\cos 3\psi_\varepsilon} \varepsilon_{ij} + \frac{2\sqrt{2}}{\gamma_0} \frac{\sin \omega}{\cos 3\psi_\varepsilon} 4 \frac{\partial J_3(D_\varepsilon)}{\partial \varepsilon_{ij}} \right\}.$$

(2.18)

Индексы в уравнениях (2.18) принимают значения $ii=11, 22, 33; ij=12, 23, 31$.

По форме уравнения (2.18) совпадают с зависимостями между напряжениями и деформациями, полученными В. В. Новожиловым [27].

Если в (2.18) положить $\omega = 0$, что характерно для простого нагружения, то придем к известным в теории пластичности соотношениям.

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0 = 2\frac{\tau_0}{\gamma_0} (\varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon_0),$$

$$ij = 11, 22, 33, 12, 23, 31,$$

(2.19)

где δ_{ij} - символ Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$).

Реализация физических соотношений в форме (2.19) для нелинейно-упругого материала возможна при установлении законов деформирования между шаровыми частями тензоров напряжений и деформаций, а также между октаэдрическими напряжениями и октаэдрическими деформациями сдвига. Различие в формах девиаторных сечений предельных поверхностей для бетона по напряжениям и по деформациям приводит к необходимости установления таких законов для каждого вида напряженного или деформированного состояния, характеризующегося при простом нагружении параметром Лодэ-Надаи по напряжениям. Тогда можно записать

$$\sigma_0 = 3K_0 \varepsilon_0 / \varphi; \quad \tau_0 = G_0 \gamma_0 / \psi, \quad (2.20)$$

где K_0 - начальный объемный модуль упругости бетона; G_0 - начальный модуль сдвига; $\varphi = f_1(\sigma_0, \mu_\sigma)$; $\psi = f_2(\tau_0, \mu_\varepsilon)$ - параметры, учитывающие развитие неупругих деформаций в бетоне для зависимостей $\sigma_0 \sim \varepsilon_0$ и $\tau_0 \sim \gamma_0$ соответственно.

Параметры φ и ψ в общем виде являются функциями напряженного или деформированного состояния. В начальный момент нагружения, когда формулы основных физических соотношений должны совпадать с формулами закона Гука, значения этих параметров принимаются равными единице. С учетом (2.20) соотношения (2.19) представим в виде

$$\varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \frac{\varphi}{3K_0} \sigma_0 = \frac{\psi}{2G_0} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0). \quad (2.21)$$

Выразив объемный модуль K_0 и модуль сдвига G_0 через начальный модуль упругости бетона E_0 и начальный коэффициент Пуассона μ_0 , выражение (2.21) представим в обычной форме закона Гука



$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{1}{E^*} [\sigma_{11} - \mu^*(\sigma_{22} + \sigma_{33})]; \\ \varepsilon_{12} &= \frac{1}{E^*} 2(1 + \mu^*)\sigma_{12};\end{aligned}\quad (2.22)$$

Величины $\varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{31}$ можно получить из (2.22) круговой подстановкой индексов 1, 2, 3.

В формулах (2.22) параметры E^* и μ^* являются переменными:

$$E^* = \frac{3E_0}{2(1 + \mu_0)\psi + (1 - 2\mu_0)\varphi}; \quad \mu^* = \frac{1 - \frac{(1 - 2\mu_0)\varphi}{(1 + \mu_0)\psi}}{2 + \frac{(1 - 2\mu_0)\varphi}{(1 + \mu_0)\psi}}.\quad (2.23)$$

Обратные (2.22) зависимости, разрешенные относительно компонент тензора напряжений, представим в матричной форме:

$$\sigma_{ij} = D\varepsilon_{ij}, \quad ij = 11, 22, 33, 12, 23, 31.\quad (2.24)$$

$$\text{где } D = \frac{E^*}{1 + \mu^*} \begin{pmatrix} \lambda & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \lambda & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.25)$$

$$\text{причём, } \lambda = \frac{1 - \mu^*}{1 - 2\mu^*}; \quad \nu = \frac{\mu^*}{1 - 2\mu^*}.$$

В соответствии со сказанным ранее, матрица упругости D является переменной.

Задача деформационной теории пластичности бетона в формулировке (2.24) сводится к последовательному решению линейных задач с переменными параметрами упругости E^* и μ^* .

В большинстве вычислительных комплексов реализован метод конечных элементов в перемещениях, а для учета физической нелинейности материалов используются шаговые алгоритмы. При шаговом расчете матрица упругости $D(\varepsilon, \Delta\varepsilon)$ может быть записана подобно (2.25) с заменой параметров E^*, μ^* на величины, которые отвечают каждому шагу нагружения по кривым $\sigma_0 \sim \varepsilon_0$ и $\tau_0 \sim \gamma_0$.

Преобразуем зависимости (2.21) для шагового нагружения. Для этой цели заменим полный дифференциал от выражений (2.21) полным приращением:

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{ij} - \frac{\Delta\varphi}{3K_0}\sigma_0\delta_{ij} - \frac{\varphi}{3K_0}\Delta\sigma_0\delta_{ij} &= \\ = \frac{\Delta\psi}{2G_0}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0) + \frac{\psi}{2G_0}(\Delta\sigma_{ij} - \delta_{ij}\Delta\sigma_0),\end{aligned}\quad (2.26)$$

где $\Delta\varepsilon_{ij}, \Delta\sigma_{ij}$ - соответственно компоненты приращений деформаций и приращений напряжений.

Преобразуя уравнения (2.26) с учетом $\Delta\varphi = \varphi' \Delta\sigma_0$ и $\Delta\psi = \psi' \Delta\tau_0$, получим

$$\Delta\varepsilon_{ij} - \frac{\varphi_1}{3K_0\varphi}\Delta\sigma_{ij}\delta_{ij} = \frac{\psi_1}{2G_0\psi}(\Delta\sigma_{ij} - \Delta\sigma_0\delta_{ij}),\quad (2.27)$$

где φ_1 - параметр, учитывающий погрешность шаговой линеаризации для закона $\sigma_0 \sim \varepsilon_0$; ψ_1 - параметр, учитывающий погрешность шаговой линеаризации для закона $\tau_0 \sim \gamma_0$;

$$\varphi_1 = (\varphi)^2\sigma_0 + \varphi\varphi'; \quad \varphi' = \frac{d\varphi}{d\sigma_0};$$

$$\begin{aligned}\psi_1 &= (\psi)^2(\sigma_{ij} - \sigma_0\delta_{ij})\frac{\Delta\tau_0}{\Delta\sigma_{ij} - \Delta\sigma_0\delta_{ij}} + \psi\psi'; \\ \psi' &= \frac{d\psi}{d\tau_0}.\end{aligned}$$

Теперь уравнения (2.27) можно представить в обычной форме закона Гука.

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{11} &= \frac{1}{E_k^*} [\Delta\sigma_{11} - \mu_k^*(\Delta\sigma_{22} + \Delta\sigma_{33})]; \\ \Delta\varepsilon_{12} &= \frac{2(1 + \mu_k^*)}{E_k^*} \Delta\sigma_{12} \text{ и т. д.}\end{aligned}\quad (2.28)$$

где

$$\begin{aligned}E_k^* &= \frac{3E_0\varphi'\psi'}{2(1 + \mu_0)\varphi'\psi_1 + (1 - 2\mu_0)\psi'\varphi_1}, \\ \mu_k^* &= \frac{1 - (1 - 2\mu_0)\psi'\varphi_1[(1 + \mu_0)\varphi'\psi_1]^{-1}}{2 + (1 - 2\mu_0)\psi'\varphi_1[(1 + \mu_0)\varphi'\psi_1]^{-1}}.\end{aligned}$$

Зависимости (2.28), разрешенные относительно вектора приращений напряжений, будут иметь вид, подобный выражению (2.24). Таким образом, задача деформационной теории пластичности бетона в форме (2.21) может быть решена шаговым методом. На каждом шаге определяются значения параметров E_k^*, μ_k^* и формируется матрица упругости $D(\varepsilon, \Delta\varepsilon)$. Параметры φ_1 и ψ_1 принимаются в начале каждого шага нагружения равными единице. Когда число шагов нагружений невелико, они могут быть откорректированы в процессе итерационных пересчетов с помощью специальных блоков программ.

Получив зависимости между напряжениями и деформациями в общем виде (2.22) и (2.28) в третьей части перейдем к установлению функций для аналитического выражения параметров пластичности φ и ψ .

Выводы.

1. На основании удельной потенциальной энергии деформации изотропного нелинейно-упругого твёрдого тела построены физические зависимости между напряжениями и деформациями.
2. Показано, что механические свойства материала характеризуются величиной коэффициента объёмного расширения (сжатия) K , функциональной связью октаэдрического,



касательного напряжения τ_0 и октаэдрического сдвига γ_0 , а также параметром, который определяется разностью коэффициентов Лоде-Надаи по деформациям μ_ϵ и напряжениям μ_σ .

3. Показано, что параметр, определяемый разностью коэффициентов Лоде-Надаи по деформациям μ_ϵ и напряжениям μ_σ является третьим параметром, характеризующим механические свойства материала.
4. Для случая простого нагружения получены физические соотношения в приращениях, которые можно непосредственно применить для реализации шагового алгоритма в методе конечных элементов.
5. Полученные зависимости между напряжениями и деформациями в общем виде использованы в третьей части статьи для установления функций используемых при формировании аналитических выражений параметров пластичности.

Библиографический список

1. Гольденблатт И. И. Нелинейные проблемы теории упругости. - М., Наука. - 1969.
2. Грин А., Адкинс Дж. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. - М., Мир. - 1965.
3. Ильюшин, А. А. Механика сплошной среды. Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М., Изд-во Моск. ун-та. - 1978. - 287с.
4. Кац, А. М. Теория упругости. - М.: Гостехтеоретиздат, 1956.
5. Лейбензон, Л. С. Курс теории упругости. - М.: Гостезиздат. - 1947.
6. Седов, Л. И. Введение в механику сплошной среды. - М.: Физматгиз. - 1962.
7. Смирнов-Аляев, Г. А. Сопротивление материалов пластическим деформациям. - М.-Л.: Машгиз. - 1949. - 248с.
8. Eringen A. C., Nonlinear Theory of Continuous Media, McGraw-Hill, New-York, 1962.
9. Green A. E., Zerna W. Theoretical Elasticity, Clarendon Press, Oxford, 1954.
10. Grioli G., Mathematical Theory of Elastic Equilibrium, Springer, Berlin, 1962.
11. Leigh D.C., Nonlinear Continuum Mechanics. - McGraw-Hill, New-York, London, 1968.
12. Nadai A. Plastic behaviour of metals in the strain hardening range // Journ. of Appl. Phys. 1937. Vol. 8. №3. P.205-213.
13. Ludwik P. Elemente der technologischen Mechanik. Berlin. Verl. J. Springer. 1909. 120p.
14. Экспериментальные основы механики деформируемых твёрдых тел. / Белл Дж. Ф. В 2-х частях. Часть II. Конечные деформации: Пер. с англ. Под ред. А.П. Филина. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. - 432 с.
15. Сопротивление материалов и основы строительной механики: Учебник для вузов / Р. А. Хечумов, А. Г. Юрьев, А. А. Толбатов; Под ред. Р. А. Хачумова. - М.: Изд-во АСВ. - 1994. - 384с.
16. Бакушев С.В. Вариант деформационной теории пластичности геометрически нелинейных сплошных сред. Труды НГАСУ. - Новосибирск: НГАСУ, 1998. - т.1, Вып.2(2) - С.11-18.
17. Бакушев, С. В. К вопросу о критериях прочности геометрически-нелинейной сплошной среды // Известия ВУЗов. Строительство. - 1994. - №5-6. - С.19-25.
18. Бакушев, С. В. Упруго пластическое деформирование геометрически нелинейной сплошной среды с внутренним трением. - В кн.: Актуальные проблемы современного строительства. Материалы всероссийской XXX научно-технической конференции: Тез. докл. - Пенза. - 1999. - С.137-138.
19. Зволинский Н. В., Риз П. М. О некоторых задачах нелинейной теории упругости // Прикл. Математика и механика. - 2. - №4. - 1939. - С. 417-426.
20. Seth B. R., Finite Strain in Elastic Problems, Phil. Trauns. Roy. Soc. London, Ser. A.234, с. 231-264, 1935.
21. Микронапряжения в конструкционных материалах // В. В. Новожилов, Ю. И. Кадашевич. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. - 1990. - 223с.
22. Изотов И. Н., Ягн Ю. И. Изучение пластического деформирования металла с деформационной анизотропией, созданной в процессе предварительного нагружения // Доклады АН СССР. - Т.139. - № 3. - 1961. - С.576-579.
23. Ягн Ю. И., Шишмарёв О. А. Некоторые результаты исследования границ упругого состояния пластически растянутых образцов никеля. Доклад АН СССР. - Т. 119. - № 1. - 1958 - С.46-48.
24. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. - Киев, 1976. - 416 с.
25. Безухов, Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М., 1968. - 512 с.
26. Работнов, Ю. М. Механика деформируемого твердого тела. - М., 1987. -712 с.
27. Новожилов, В. В. Теория упругости. - М.: Судпромгиз. - 1958. - 370с.
28. Круглов, В. М. Нелинейные соотношения и критерий прочности бетона в трёхосном



напряженном состоянии. // Строительная механика и расчет сооружений. 1987. - №1. - С. 40-48.

29. Новожилов, В. В. О связи между напряжениями и деформациями в нелинейно упругой среде // ПММ. 1951. Т.15. – С.183-194.

30. Зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейно деформируемом

теле. Часть 1. Основные принципы и соотношения механики деформируемого твердого тела / В. М. Круглов, С. В. Бакушев, А. И. Шейн [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 4(23). – С. 154-163. – DOI 10.51608/26867818_2023_4_154. – EDN BEIHQS.

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

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.



Научная статья

УДК УДК 539.3:624.073

ГРНТИ: 30.19.17: Оболочки

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела; 2.1.9. Строительная механика

DOI 10.51608/26867818_2024_1_92

К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ ДВУХ ВИДОВ АНИЗОТРОПИИ

© Авторы 2024

SPIN: 8966-7812

ORCID 0000-0001-8601-4021

ScopusID: 6507502084

ResearcherID: ABA-7387-2021

ТРЕЩЁВ Александр Анатольевич

член-корреспондент РААСН, доктор технических наук,
профессор,

заведующий кафедрой ССМиК

Российская академия архитектуры и строительных наук;

Тульский государственный университет

(Россия, Тула, e-mail: taa58@yandex.ru)

SPIN: 2755-2105

ScopusID: 56341418200

ResearcherID: AAN-5972-2020

ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич

доктор технических наук, доцент кафедры ССМиК

Тульский государственный университет

(Россия, Тула, e-mail: katranv@yandex.ru)

ДОРОШЕНКО Денис Игоревич

аспирант

Тульский государственный университет

(Россия, Тула, e-mail: doroshenki2@gmail.com)

Аннотация. Рассматривается цилиндрическая оболочка, которая является объектом проектирования в различных промышленных комплексах. Внимание уделено особенностям оболочек, изготовленных из материалов, обладающих свойством наведенной (деформационной) анизотропии. Изучается влияние структурной ортотропии на состояние оболочки при ее нагружении внутренним давлением. Учитывается также воздействие температуры на оболочку, хотя поля температуры и механических напряжений могут рассматриваться независимо друг от друга. Традиционные модели термомеханического нагружения оказываются ненадежными в случае наличия деформационной анизотропии материалов, поэтому в работе используется методика пространства нормированных напряжений. Результаты исследования представлены в виде дифференциальных уравнений и частных решений, описывающих прогнозные характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки при нагружении.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка; наведенная анизотропия; ортотропия; температура; несвязанная термоупругость; механика деформируемого твердого тела; строительная механика; нормированные пространства

Для цитирования: Трещёв А.А., Теличко В.Г., Дорошенко Д.И. К оценке влияния воздействия температуры на деформирование круговой цилиндрической оболочки с учетом двух видов анизотропии // Эксперт: теория и практика. 2024. № 1 (24). С. 92-104. doi 10.51608/26867818_2024_1_92



Original article

TO ASSESS THE INFLUENCE OF TEMPERATURE FOR DEFORMATION OF A CIRCULAR CYLINDRICAL SHELLS CONSIDERING TWO TYPES OF ANISOTROPY

© 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)

DOROSHENKO Denis Igorevich

PhD Candidate

Tula State University

(Russia, Tula, e-mail: doroshenki2@gmail.com)

Abstract. This article studies the cylindrical shell that is the object of design in various industrial complexes. Attention is paid to the features of shells made of materials with structural and deformation anisotropy. The study examines the impact of structural orthotropy on the state of the shell during internal pressure loading. The effect of temperature on the shell is also considered, although the fields of temperature and mechanical stress can be considered independently of each other. Traditional models of thermomechanical loading turn out to be unreliable in the case of deformation anisotropy of materials, therefore, the technique of tensor space of normalized stresses is used in this work. The results of the study are presented in the form of differential equations and partial solutions that describe the characteristics of the shell state under loading.

Keywords: cylindrical shell; induced anisotropy; orthotropy; temperature; unbound thermoelasticity; solid deformed body mechanics; construction mechanics; normalized spaces

For citation: Treshchev A.A., Telichko V.Gr., Doroshenko D.I. To assess the influence of temperature for deformation of a circular cylindrical shells considering two types of anisotropy // Expert: theory and practice. 2024. № 1 (24). Pp. 92-104 (InRuss.). doi 10.51608/26867818_2024_1_92

Введение. В процессе развития методов проектирования и строительства все чаще используются композитные материалы, которые отличаются повышенной прочностью и жесткостью. Они образуются из полимерных матриц, укрепленных стекловолокнами или базальтовыми наполнениями. Данные композитные материалы обладают свойством структурной ортотропии и наведенной (деформационной) анизотропии [1-3]. Структурно ортотропные материалы, помимо своей жесткости, зависят от различных направлений и теплофизических параметров [4-6]. Применение классических теорий и подходов механики, связанных с обобщенным законом Гука или деформационной теорией А. А. Ильюшина [7], приводит к существенным ошибкам в определении

параметров НДС конструкций и изменению качественного представления о них. Когда речь идет о композитных материалах с двойной анизотропией, этот вопрос становится гораздо сложнее. При этом повышение температуры может привести к растяжению материала в одном направлении и сжатию в другом, что усложняет расчеты.

Для решения настоящей задачи требуется эффективно использовать уточненные математические модели, учитывающие все специфические особенности композитных материалов с двойной анизотропией и их поведение при воздействии температурных перепадов. При этом необходимо учитывать, что традиционные методы и теории строительной механики далеко не всегда применимы для расчетов подобных

конструкций, и в конкретном случае требуется использование более сложных и уточненных моделей [8].

Тем не менее, большинство известных моделей, разработанных для материалов с двойной анизотропией, имеют значительные недостатки [8-14], на которых здесь мы не будем подробно останавливаться. Вместо этого мы предлагаем использовать наш новый подход к решению поставленной задачи, новые эффективные уравнения состояния.

Упомянутые композиты, благодаря высоким значениям модулей упругости и достаточно высокой прочности, нашли широкое применение в «строительстве» оболочечных конструкций с минимальной толщиной, массой и высокой эффективной несущей способностью.

Учет температурного перепада на поверхностях значительно повышает сложность прогнозного моделирования и определения эффективных параметров НДС оболочек с двойной анизотропией. Решение сходных термомеханических задач, несмотря на их важность, до сих пор осуществляется только эпизодически, что не позволяет разработать единый подход к проектированию пространственных тонкостенных сооружений из вышеуказанных композитных материалов.

В работе представлена вариация замкнутой круговой цилиндрической оболочки, нагруженной осесимметрично внутренним давлением. Цилиндрические оболочки, резервуары и трубопроводы одновременно могут подвергаться силовым и температурным воздействиям, поэтому

задача описания их НДС связана с термоупругой деформацией. Однако, как показано в работах [5-6; 10; 12], связанность температурных и силовых воздействий проявляется в малый начальный интервал времени и поэтому процесс теплопередачи можно рассматривать в несвязанной форме задачи термоупругости.

Некоторые ортотропные материалы, используемые в конструкциях, могут быть эффективно связаны с температурными и силовыми воздействиями, однако этот эффект наблюдается только до момента, когда между поверхностями конструкции установится стационарный температурный перепад. Когда такое равновесие достигается, связь между температурной и силовой нагрузкой на конструкцию, в целом, нивелируется. Следовательно, при рассмотрении процессов теплопроводности в конструкциях с неравномерным нагревом от внешних сред, целесообразно рассматривать задачу термоупругости в несвязанной постановке, не теряя точности решения при значительном упрощении процесса получения оценки НДС [6].

Постановка задачи исследования.

Стеклопластиковую цилиндрическую оболочку (стеклопластик является ортотропным материалом со свойством двойной анизотропии [6; 8; 15]), показанную на рис. 1, будем рассматривать в цилиндрической системе координат, связанной с главными осями ортотропии (триада гауссовых координат $\beta_1, \beta_2, \beta_3$).

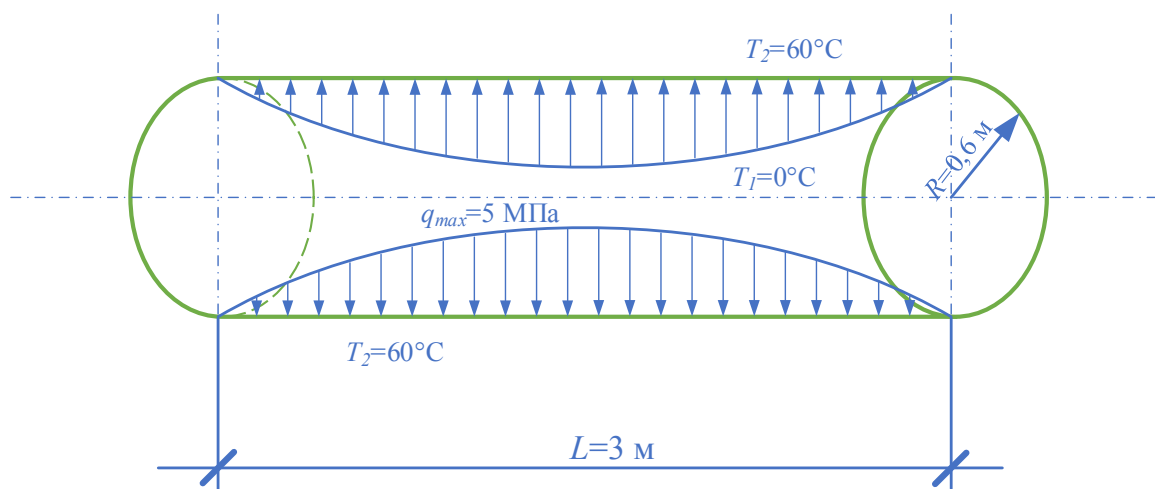


Рис. 1. Цилиндрическая оболочка из стеклопластика [8]

Геометрические параметры оболочки примем следующим образом: длина $L=3$ м, толщина стенки $h=0,02$ м, радиус срединной цилиндрической поверхности $R=0,6$ м. Закрепление торцов оболочки при $\beta_1 = 0, \beta_1 = L$ выберем шарнирным. Начальные условия по температуре: любая точка оболочки имеет одинаковую температуру – $T_0 = 22^\circ\text{C}$. При дальнейшем эксплуатации конструкции будем считать, что на внешней поверхности температура

повышается до $T_2 = 60^\circ\text{C}$, а на внутренней поверхности происходит охлаждение до $T_1 = 0^\circ\text{C}$. Далее примем теоретическое допущение, что температурная неравномерность обнаруживаются исключительно по толщине оболочки с разностью ΔT , которая представляется функцией нормальной координаты β_3 , а вдоль осей, в силу симметрии оболочки и воздействий, β_1 и β_2 температура не



меняется. Загружение внутренним давлением осуществляется с максимальной интенсивностью

$$q_3 = 5 \text{ МПа (см. рис. 1),}$$

$$q_3^{(x)} = \frac{4q_3x}{L^2}(L-x),$$

где $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ – координата вдоль оси оболочки.

В работах [6, 8] были предложены нелинейные потенциальные соотношения (1) между деформациями и напряжениями для ортотропных материалов на основе анализа многочисленных экспериментальных данных по их деформированию. Эти соотношения позволяют достаточно точно описывать поведение материалов при различных вариантах внешнего воздействия.

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots \quad (1)$$

где

$$W = W(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}\tau_{21}, \tau_{23}\tau_{32}, \tau_{31}\tau_{13}, \tau_{12}\tau_{23}\tau_{31})$$

W_n – однородный многочлен степени $n+1$ по напряжениям.

Коэффициенты, которые входят в разложение (1), представляют собой параметры материала, которые зависят от вида напряженного состояния и могут быть определены экспериментально. В случае, когда энергетические зависимости ограничены квазилинейным уровнем, мы имеем:

$$\begin{aligned} W_1 = & A_1\sigma_{11}^2 + A_2\sigma_{22}^2 + A_3\sigma_{33}^2 + \\ & + A_4\sigma_{11}\sigma_{22} + A_5\sigma_{22}\sigma_{33} + A_6\sigma_{33}\sigma_{11} + \\ & + A_7\tau_{12}\tau_{21} + A_8\tau_{23}\tau_{32} + A_9\tau_{31}\tau_{13} \end{aligned} \quad (2)$$

Параметры $A_k(\alpha_{ij})$ являются функциями, зависящими от комбинаций нормированных напряжений [8]:

$$\alpha_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{S}; \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}}; \quad (3)$$

S – модуль вектора полного напряжения.

Условия нормировки примем по [8]:

$$\alpha_{ij}\alpha_{ij} = \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2\alpha_{12}^2 + 2\alpha_{23}^2 + 2\alpha_{31}^2 = 1 \quad (4)$$

С учетом зависимостей $A_k(\alpha_{ij})$, потенциальные соотношения (2), запишем так:

$$\begin{aligned} W_1 = & \frac{1}{2}(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + \frac{1}{2}(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 + \\ & + \frac{1}{2}(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} + \\ & + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} + [A_{3311} + \tilde{A}_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} + \\ & + A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как рассматривается тонкостенная оболочка, то справедливость гипотез Кирхгофа-Лява не вызывает сомнения. Классифицируем оболочку как пологую, деформирование которой можно описать известными зависимостями:

а) геометрические зависимости (деформации в средней поверхности):

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5\theta_1^2; \quad \varepsilon_2 = kw; \quad (6)$$

где u , w – осевые и радиальные перемещения срединной поверхности; $k = 1/R$ – кривизна полой оболочки ($\beta_3 k \ll 1$) до деформации по оси β_2 ; угол поворота $\theta_1 = -w_{,1}$;

б) кривизна срединной поверхности (в процессе деформирования), примем:

$$\chi_1 = -w_{,11}; \quad (7)$$

в) суммарные деформации в поперечных сечениях оболочки (с учетом того, что

$$\begin{aligned} e_{11} = & \varepsilon_1 + \beta_3\chi_1; \quad e_{22} = \varepsilon_2; \\ e_{11} = & u_{,1} + 0,5(w_{,1})^2 - zw_{,11}; \quad (8) \\ e_{22} = & kw. \end{aligned}$$

Независимо от свойств материала и сложности уравнений состояния, необходимо соблюдать общие законы деформирования и геометрические зависимости (связь перемещений с деформациями). Для цилиндрических оболочек, выполненных из композитных материалов (деформационно анизотропных материалов), применяются уравнения, справедливые для общей нелинейной теории анизотропных оболочек [8; 16]. Силовые факторы приводятся к срединной поверхности цилиндрической оболочки при $\beta_3 = 0$.

Так как задача решается как осесимметричная, в конфигурации, указанной выше, с учетом отсутствия крутящих моментов ($\tau_{12} = e_{12} = 0$), то условия равновесия приводятся к виду [16]:

$$N_{1,1} = 0;$$

$$M_{1,1} - Q_1 - N_1\theta_1 = 0; \quad (9)$$

$$Q_{1,1} - kN_2 + q_3 = 0;$$

где N_k – компланарные усилия (со срединной поверхностью); Q_1 – поперечное усилие; M_1 – изгибающий момент.

Выражая из второго уравнения (9) Q_1 (с учетом дифференцирования) и подставляя его в третье уравнение, получаем систему из двух уравнений:

$$N_{1,1} = 0;$$

$$M_{1,1} + N_1w_{,11} - kN_2 + q_3 = 0; \quad (10)$$

где



$$\begin{aligned} N_1 &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} d\beta_3; \\ N_2 &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{22} d\beta_3; \\ M_1 &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} \beta_3 d\beta_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Следствием соотношений (5) для осесимметричной задачи являются нижеприведенные соотношения связывающие компоненты тензора деформаций напряжений в главных осях ортотропии [6]:

$$e_{11} = C_{1111}\sigma_{11} + C_{1122}\sigma_{22} + \alpha_{1T}\Delta T, \quad e_{22} = C_{1122}\sigma_{11} + C_{2222}\sigma_{22} + \alpha_{2T}\Delta T; \quad (12)$$

здесь: α_{1T}, α_{2T} – коэффициенты линейного температурного расширения в главных осях ортотропии, ΔT – изменение температуры в точках тела оболочки по ее толщине относительно начальной. Параметры $C_{1111}, C_{1122}, C_{2222}$ в формулах (12) примут следующий вид [15]:

$$\begin{aligned} C_{1111} &= (A_{1111} + B_{1111}\alpha_{11}) + \frac{1}{2}[B_{1111}\alpha_{11}(1 - \alpha_{11}^2) - B_{2222}\alpha_{22}^3] + B_{1122}\alpha_{22}(1 - \alpha_{11}^2 - \alpha_{11}\alpha_{22}); \\ C_{2222} &= (A_{2222} + B_{2222}\alpha_{22}) + \frac{1}{2}[B_{2222}\alpha_{22}(1 - \alpha_{22}^2) - B_{1111}\alpha_{11}^3] + B_{1122}\alpha_{11}(1 - \alpha_{22}^2 - \alpha_{11}\alpha_{22}); \\ C_{1122} &= A_{1122} + B_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22}); \end{aligned}$$

где A_{ijkm}, B_{ijkm} – однозначно связанные с модулями упругости (E_k^\pm) и коэффициентами поперечной деформации (ν_{ij}^\pm) материала в главных осях ортотропии (принимая во внимание различные механические характеристики при растяжении и сжатии) [15]. Кроме того, с учетом принятых гипотез Кирхгофа, параметры α_{ij} принимают следующие значения:

$$\alpha_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2}}, \quad \alpha_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2}}.$$

Считая справедливыми известные экспериментальные сведения по деформированию материалов на одноосное растяжение и сжатие вдоль главной оси анизотропии, константы потенциала деформаций, с учетом технических постоянных, выразятся так [8, 15]:

$$\begin{aligned} A_{kkkk} &= (1/E_k^+ + 1/E_k^-) / 2; \\ A_{ijij} &= -(\nu_{ij}^+ / E_j^+ + \nu_{ij}^- / E_j^-) / 2; \\ \nu_{ij}^+ / E_j^+ &= \nu_{ji}^+ / E_i^+; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{kkkk} &= (1/E_k^+ - 1/E_k^-) / 2; \\ B_{ijij} &= -(\nu_{ij}^+ / E_k^+ - \nu_{ij}^- / E_j^-) / 2; \\ \nu_{ij}^- / E_j^- &= \nu_{ji}^- / E_i^-; \\ i, j, k &= 1, 2. \end{aligned}$$

Система разрешающих уравнений.

Для удобства построения разрешающих дифференциальных уравнений оболочки обратим зависимости (12):

$$\sigma_{11} = D_{11}e_{11} + D_{12}e_{22} - \varphi_{1T}; \quad \sigma_{22} = D_{12}e_{11} + D_{22}e_{22} - \varphi_{2T}; \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} D_{11} &= \frac{C_{2222}}{\Delta}; \quad D_{12} = -\frac{C_{1122}}{\Delta}; \quad D_{22} = \frac{C_{1111}}{\Delta} \\ (\text{определитель } \Delta &= C_{1111}C_{2222} - C_{1122}^2); \\ \varphi_{1T} &= D_{11}\alpha_{1T}\Delta T + D_{12}\alpha_{2T}\Delta T; \\ \varphi_{2T} &= D_{12}\alpha_{1T}\Delta T + D_{22}\alpha_{2T}\Delta T. \end{aligned}$$

Проинтегрировав выражения для напряжений (13) по правилам (11), возможно записать силовые факторы как:

$$\begin{aligned} N_1 &= K_{11}\varepsilon_1 + K_{12}\varepsilon_2 + P_{11}\chi - \eta_{1T}; \quad N_2 = K_{12}\varepsilon_1 + K_{22}\varepsilon_2 + P_{21}\chi - \eta_{2T}; \\ M_1 &= P_{11}\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_2 + H_{11}\chi - \gamma_T; \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \eta_{iT} &= \int_{-h/2}^{h/2} \varphi_{iT} d\beta_3; \quad \gamma_T = \int_{-h/2}^{h/2} \varphi_{1T} \beta_3 d\beta_3; \\ K_{ij} &= \int_{-h/2}^{h/2} D_{ij} d\beta_3; \quad P_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} D_{ij} \beta_3 d\beta_3; \\ H_{ij} &= \int_{-h/2}^{h/2} D_{ij} \beta_3^2 d\beta_3, \quad (i, j = 1, 2). \end{aligned}$$

Подставив выражения (14) в уравнения (10) и учитывая соотношения (6) можно получить систему разрешающих уравнений в перемещениях для рассматриваемой задачи.

Полученную систему разрешающих уравнений для получения однозначного решения необходимо дополнить граничными условиями:

$$w = 0; \quad u = 0; \quad M_1 = 0.$$

Рассматривая процесс теплопереноса как стационарный, с учетом перепада температуры только на поверхностях оболочки (изменение температуры происходит только по нормальной координате β_3 , которая ортогональна к изотермическим поверхностям), приходим к простейшему варианту уравнения теплопроводности в форме: $T_{,t} = a_3 T_{,33}$, где $a_3 = \lambda / C$ – коэффициент температуропроводности по нормали к



криволинейной поверхности оболочки; t – параметр времени; T – температура в точке материала; λ – коэффициент теплопроводности по нормальной оси к поверхности оболочки; C – удельная объемная теплоемкость материала.

Учитывая высокий коэффициент температуропроводности выбранных материалов, можно пренебречь скоростью распространения тепла внутри тела оболочки, следовательно рассмотрение термомеханической задачи уместно в момент, когда температурное распределение уже эффективно установилось.

Начальные условия для температурной задачи: температура оболочки в момент времени $t = 0$ равна T_0 . Граничные условия: распределение температуры на поверхностях оболочки T_1 и T_2 в момент времени $t = t_k$, то есть осуществляется нагрев или охлаждение оболочки на соответствующих поверхностях до указанных наперед температур.

Для получения точного и эффективного решения прикладной задачи, где наличествует двойная нелинейность, необходимо производить ее решение в приращениях искомых функций по методу последовательных возмущений параметров В.В. Петрова [17] в сочетании с методом конечных разностей (МКР). Аппроксимацию производных следует производить конечными разностями повышенной точности для достижения искомой точности прогноза параметров НДС [18]. Для решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), в разработанном авторами программном обеспечении, применяется вариант метода Холецкого, эффективный для диагональных матриц.

Линеаризация системы дифференциальных уравнений.

Перед применением метода Петрова В. В. [17] необходимо линеаризовать систему разрешающих уравнений, причем в данном случае это целесообразно выполнить еще на этапе их построения. Ниже приведены необходимые шаги.

Деформации срединной поверхности в приращениях, определим как:

$$\begin{cases} \delta \varepsilon_1 = \delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1}; \\ \delta \varepsilon_2 = k \delta w; \end{cases} \quad (15)$$

где δu , δw – приращения осевых перемещений и прогибов. То есть

$$\begin{cases} \delta e_{11} = \delta \varepsilon_1 + \beta_3 (-\delta w_{,11}); \\ \delta e_{22} = \delta \varepsilon_2; \end{cases} \quad (16)$$

в перемещениях:

$$\begin{cases} \delta e_{11} = \delta u_{,1} + w_{,1} \delta w_{,1} - \beta_3 \delta w_{,11}; \\ \delta e_{22} = k \delta w. \end{cases}$$

Для линеаризации физических зависимостей разложим их в ряд Тейлора [17]:

$$\begin{aligned} \delta e_{11} &= \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}} \delta \sigma_{11} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}} \delta \sigma_{22} + \frac{\partial e_{11}}{\partial (\Delta T)} \delta (\Delta T), \\ \delta e_{22} &= \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}} \delta \sigma_{11} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}} \delta \sigma_{22} + \frac{\partial e_{22}}{\partial (\Delta T)} \delta (\Delta T). \end{aligned} \quad (17)$$

Переходя к приращениям для напряжений, очевидным образом получим, также, как и для (14):

$$\begin{aligned} \delta \sigma_{11} &= D_{11} \delta e_{11} + D_{12} \delta e_{22} - \tilde{\varphi}_{1T}; \\ \delta \sigma_{22} &= D_{12} \delta e_{11} + D_{22} \delta e_{22} - \tilde{\varphi}_{2T}; \end{aligned} \quad (18)$$

где:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{1T} &= D_{11} \alpha_{1T} \delta (\Delta T) + D_{12} \alpha_{2T} \delta (\Delta T); \\ \tilde{\varphi}_{2T} &= D_{12} \alpha_{1T} \delta (\Delta T) + D_{22} \alpha_{2T} \delta (\Delta T). \end{aligned}$$

Приращения силовых факторов δN_1 , δN_2 , δM_1 определим интегрированием приращений напряжений, полностью аналогично (11):

$$\begin{aligned} \delta N_1 &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_{11} d\beta_3; \\ \delta N_2 &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_{22} d\beta_3; \\ \delta M_1 &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_{11} \beta_3 d\beta_3. \end{aligned} \quad (19)$$

Действуя аналогично, как и при получении выражений (14), в результате интегрирования уравнений (18), получим зависимости:

$$\begin{aligned} \delta N_1 &= K_{11} \delta \varepsilon_1 + K_{12} \delta \varepsilon_2 + P_{11} \delta \chi - \tilde{\eta}_{1T}; \\ \delta N_2 &= K_{12} \delta \varepsilon_1 + K_{22} \delta \varepsilon_2 + P_{21} \delta \chi - \tilde{\eta}_{2T}; \\ \delta M_1 &= P_{11} \delta \varepsilon_1 + P_{12} \delta \varepsilon_2 + H_{11} \delta \chi - \tilde{\gamma}_T; \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\eta}_{iT} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tilde{\varphi}_{iT} d\beta_3; \\ \tilde{\gamma}_T &= \int_{-h/2}^{h/2} \tilde{\varphi}_{1T} \beta_3 d\beta_3, \\ &(i, j, k = 1, 2). \end{aligned}$$

Система уравнений (10) в приращениях переписывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta N_{1,1} &= 0; \\ \delta M_{1,11} + N_1 \delta w_{,11} + \delta N_1 w_{,11} - k \delta N_2 + N_{1,1} \delta w_{,1} + \delta N_{1,1} w_{,1} + \delta q_3 &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

где δq_3 – приращение внутреннего давления.



Подставляя в (21) формулы из (20) и (15), получим линейризованную систему дифференциальных уравнений в перемещениях:

$$\begin{aligned}
 & K_{11>1} (\delta u_{>1} + w_{>1} \delta w_{>1}) + K_{11} (\delta u_{>11} + w_{>11} \delta w_{>1} + w_{>1} \delta w_{>11}) + \\
 & + K_{12>1} k \delta w + K_{12} k \delta w_{>1} - P_{11>1} \delta w_{>11} - P_{11} \delta w_{>111} - \tilde{\eta}_{1T>1} = 0, \\
 & P_{11>11} (\delta u_{>1} + w_{>1} \delta w_{>1}) + 2P_{11,1} (\delta u_{>11} + w_{>11} \delta w_{>1} + w_{>1} \delta w_{>11}) + \\
 & + P_{11} (\delta u_{>111} + w_{>111} \delta w_{>1} + 2w_{>11} \delta w_{>11} + w_{>1} \delta w_{>111}) + \\
 & + P_{12>11} k \delta w + 2P_{12,1} k \delta w_{>1} + P_{12} k \delta w_{>11} - H_{11>11} \delta w_{>11} - 2H_{11,1} \delta w_{>111} - \\
 & - H_{11} \delta w_{>1111} - \tilde{\gamma} T_{>11} + (K_{11} u_{>1} + K_{12} k w - P_{11} w_{>11} - \eta_{1T>1}) \delta w_{>11} + \\
 & + (K_{11} (\delta u_{>1} + w_{>1} \delta w_{>1}) + K_{12} k \delta w - P_{11} \delta w_{>11} - \tilde{\eta}_{1T}) \delta w_{>11} - \quad (22) \\
 & - k (K_{12} (\delta u_{>1} + w_{>1} \delta w_{>1}) + K_{22} k \delta w - P_{12} \delta w_{>11} - \tilde{\eta}_{2T}) + \\
 & + (K_{11>1} u_{>1} + K_{11} u_{>22} + K_{12>1} k w + K_{12} k w_{>1} - P_{11} w_{>11} - P_{11} w_{>111} - \eta_{1T>1}) \delta w_{>1} + \\
 & + (K_{11>1} (\delta u_{>1} + w_{>1} \delta w_{>1}) + K_{11} (\delta u_{>11} + w_{>11} \delta w_{>1} + w_{>1} \delta w_{>11})) w_{>1} + \\
 & + (K_{12>1} k \delta w + K_{12} k \delta w_{>1} - P_{11>1} \delta w_{>11} - P_{11} \delta w_{>111} - \tilde{\eta}_{1T>1}) w_{>1} + \delta q_3 = 0.
 \end{aligned}$$

Для получения замкнутой системы дополним (22) граничными условиями в приращениях. Шарнирное закрепление на торцах оболочки (по координатам $\beta_1 = L$ и $\beta_1 = 0$) – $\delta u = 0$; $\delta w = 0$; $\delta M_1 = 0$.

Результаты прогнозирования НДС цилиндрической оболочки из стеклопластика.

Материал принят с характеристиками из работы [8]: модули упругости и коэффициенты поперечной деформации по главным осям ортотропии

$E_1^+ = 140 \text{ ГПа}$, $E_1^- = 70 \text{ ГПа}$, $E_2^+ = 280 \text{ ГПа}$,
 $E_2^- = 140 \text{ ГПа}$, $\nu_{12}^+ = 0,2$, $\nu_{12}^- = 0,3$;
 коэффициенты линейного теплового расширения по этим же направлениям: $\alpha_1^\pm = 33 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$;
 $\alpha_2^\pm = 40 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$ [6; 8].

На рис. 2 – 12 показаны наиболее важные и характерные результаты проведенных расчетов. В соответствии с принятой осевой симметрией рассматриваемой задачи, характеристики НДС приводятся вдоль линии образующей.

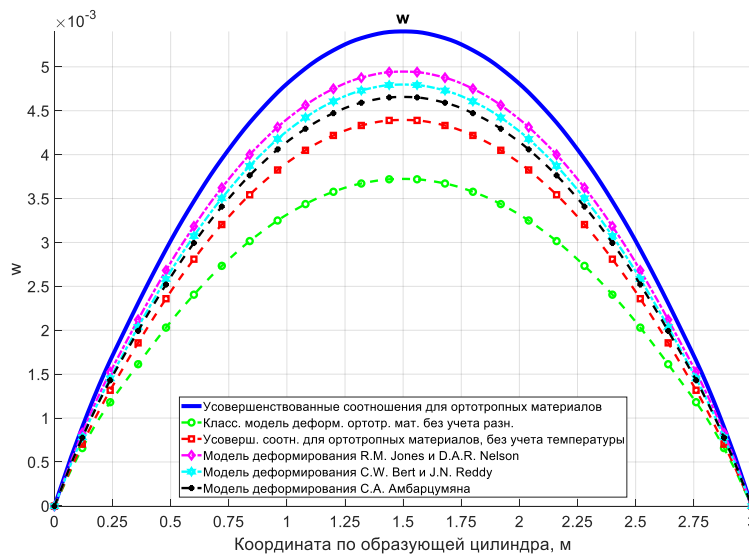


Рис. 2. Прогнозы срединной поверхности оболочки, м

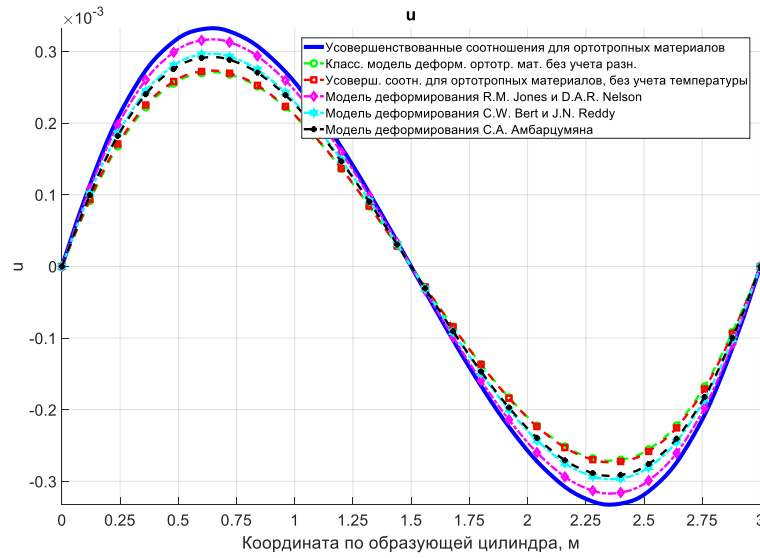


Рис. 3. Горизонтальные смещения в срединной поверхности, м

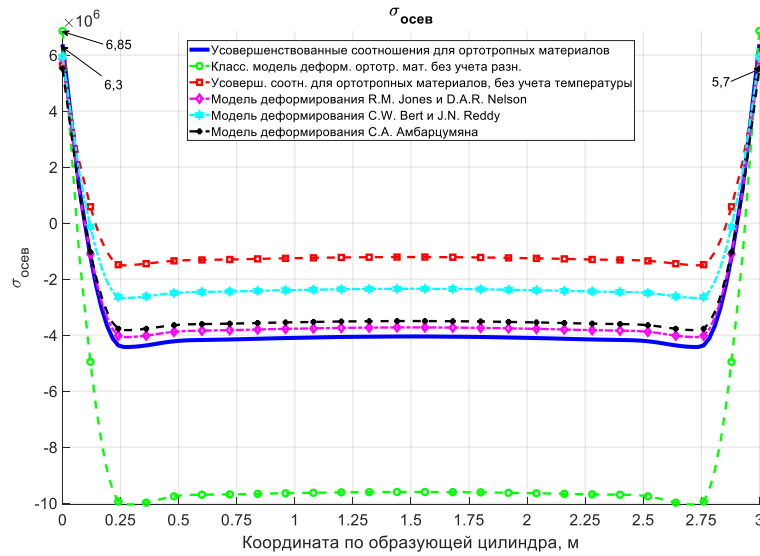


Рис. 4. Осевые напряжения на внутренней поверхности, Па

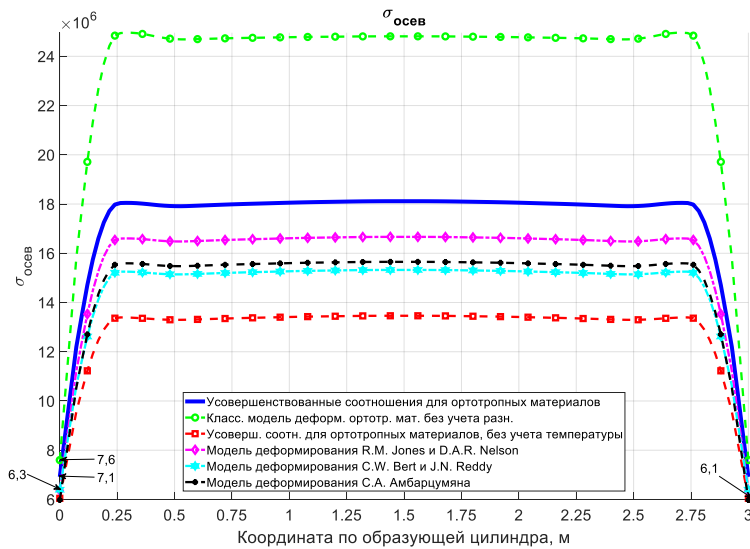


Рис. 5. Осевые напряжения на внешней поверхности, Па

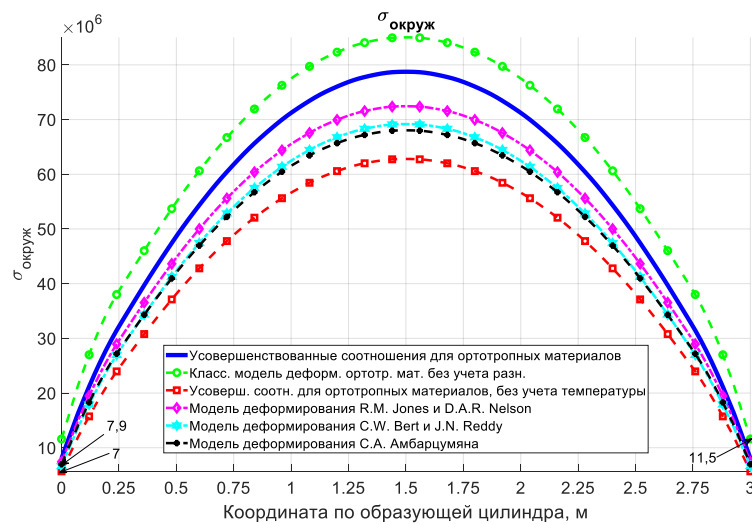


Рис. 6. Окружные напряжения на внутренней поверхности, Па

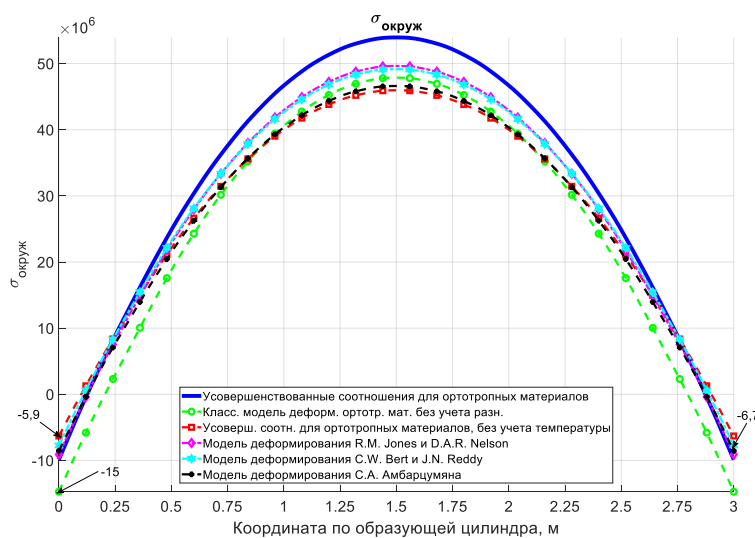


Рис. 7. Окружные напряжения на внешней поверхности, Па

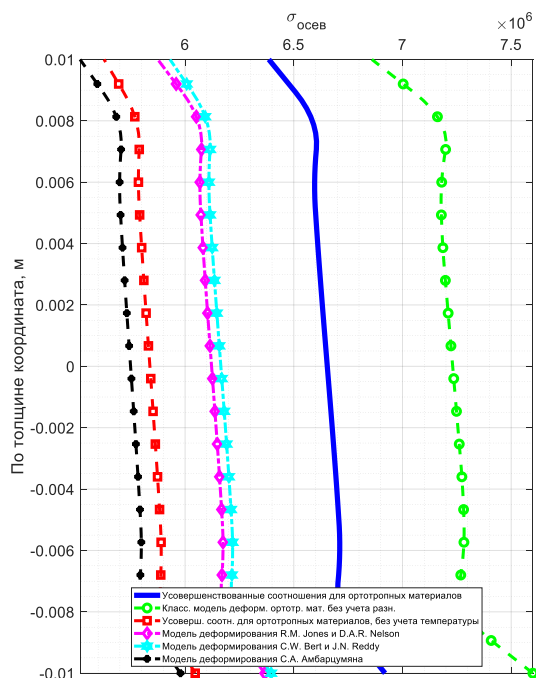


Рис. 8. Осевые напряжения по координате β_3 (по толщине) на опоре, Па

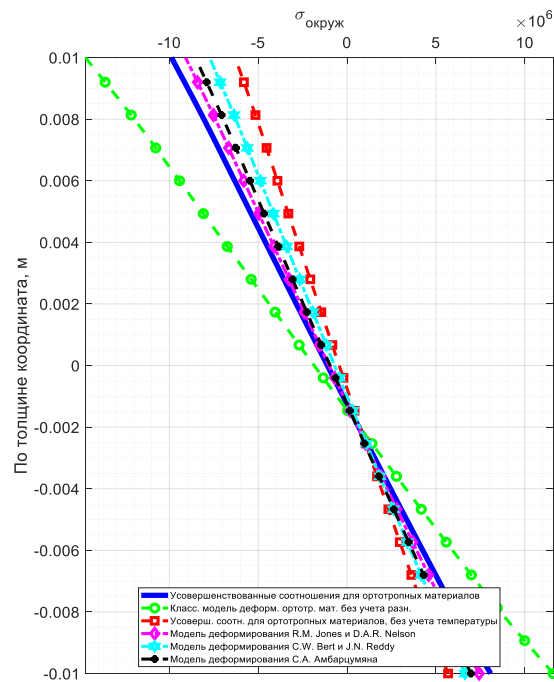


Рис. 9. Окружные напряжения по координате β_3 (по толщине) на опоре, Па

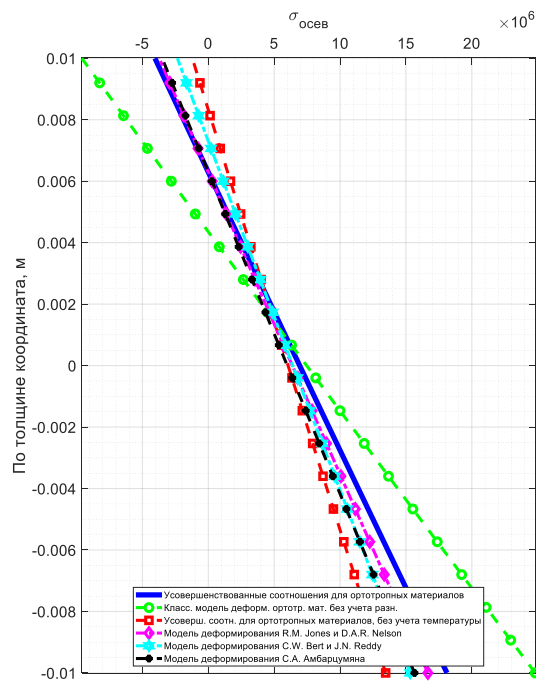


Рис. 10. Осевые напряжения по координате β_3 (по толщине) в середине, Па

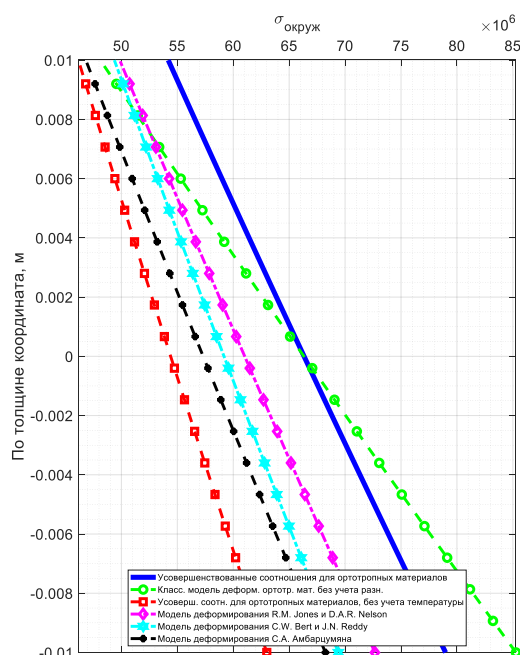


Рис. 11. Окружные напряжения по координате β_3 (по толщине) в середине, Па

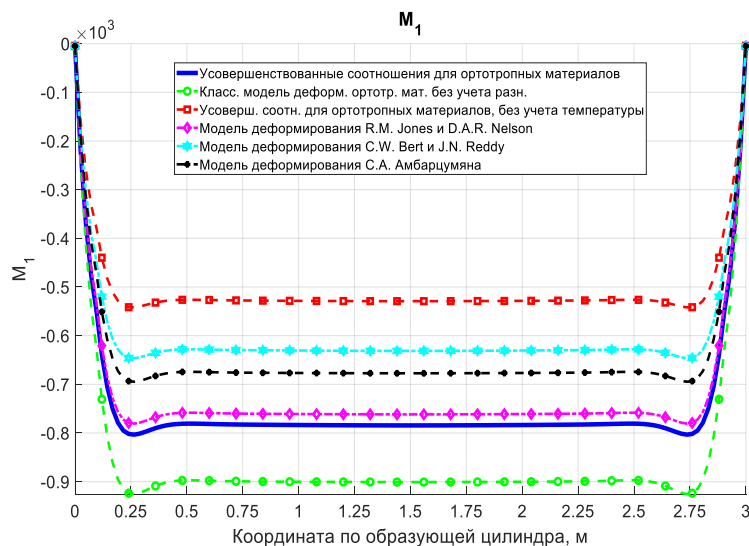


Рис. 12. Момент M_1 вдоль образующей оболочки, Н·м/м

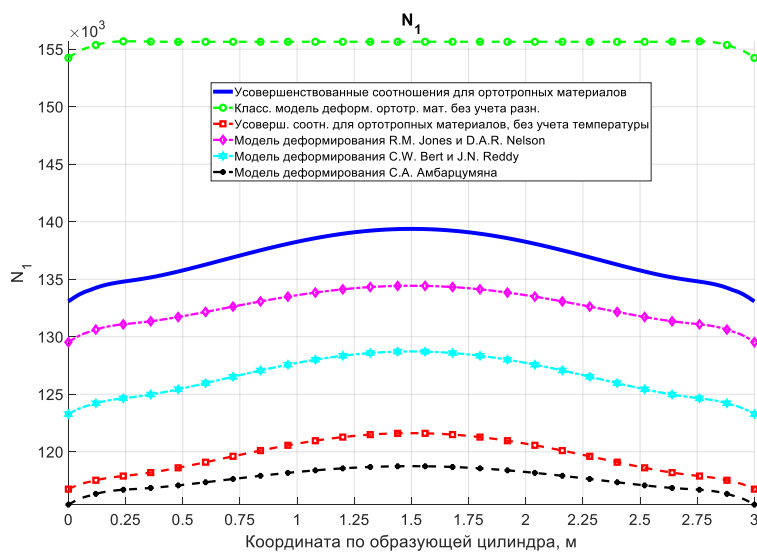


Рис. 13. Сила N_1 вдоль образующей оболочки, Н/м



Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных для различных теорий, применяемых для решения задач, аналогичных приведенной в статье:

- усовершенствованные определяющие соотношения [15], используемые в представленной модели;
- расчет без учета свойств разнородности (с усредненными характеристиками);
- соотношения [15] без учета температурного воздействия;
- теория С. W. Bert – J. N. Reddy [10-11];
- соотношения R. M. Jones – D.A.R. Nelson [13];
- по теории С. А. Амбарцумяна [9; 19].

При расчете параметров НДС цилиндрической оболочки, в условиях одновременного воздействия температуры и внутреннего давления, с применением новых оригинальных соотношений [15], разница составила:

- для вертикальных перемещений: до 35% по отношению к расчету с усредненными характеристиками, до 18% по отношению к расчету без учета температуры, до 14,5% к соотношениям С. А. Амбарцумяна, до 10% к теории С. W. Bert – J. N. Reddy и до 9% при использовании соотношений R. M. Jones – D.A.R. Nelson;
- для осевых напряжений: до 47% по отношению к расчету с усредненными характеристиками, до 40% по отношению к расчету без учета температуры, до 25% к соотношениям С. А. Амбарцумяна, до 15% к теории С. W. Bert – J. N. Reddy и до 27% при использовании соотношений R. M. Jones – D.A.R. Nelson;
- для окружных напряжений: до 22% по отношению к расчету с усредненными характеристиками, до 33% по отношению к расчету без учета температуры, до 24% к соотношениям С. А. Амбарцумяна, до 21% к теории С. W. Bert – J. N. Reddy и до 12% при использовании соотношений R. M. Jones – D.A.R. Nelson.
- для силовых факторов: до 15% по отношению к расчету с усредненными характеристиками, до 25% по отношению к расчету без учета температуры, до 12% к соотношениям С. А. Амбарцумяна, до 5% к теории С. W. Bert – J. N. Reddy и до 15% при использовании соотношений R. M. Jones – D.A.R. Nelson.

Выводы.

Выполненные авторами оригинальные исследования по прогнозированию НДС модели ортотропной оболочки в форме цилиндра позволяет утверждать следующее:

- предлагаемый подход, основанный на теории нормированных пространств и усовершенствованных определяющих соотношениях, предложенных в работе [15] обеспечивает реалистичность, а также точность и эффективность решения по сравнению с существующими теориями;
- конкретные результаты вычислительных экспериментов с использованием разработанной модели подтверждают, что учет в расчетной модели деформационной анизотропии вскрывает существенные недостатки традиционных подходов по определению параметров НДС оболочечных конструкций.

Библиографический список

1. О нелинейном деформировании углепластиков: эксперимент, модель, расчет / Е. В. Амелина [и др.] // ИВТ СО РАН: Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. №5. С. 27– 52.
2. Каюмов, Р. А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов / Р. А. Каюмов, С. А. Луканкин, В. Н. Паймушин, С. А. Холмогоров // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. 2015. Т. 157. Кн. 4. С. 112–132.
3. Development of the recommendations on selection of glass-fiber reinforced polyurethanes for vehicle parts / L. N. Shafigullin, A. A. Bobrishev, A. N. Shafigullina [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, No. 23. – P. 43758-43762. – EDN WOTQAX.
4. Hsu Y. S., Bert C. W., Reddy J. N. Thermoelasticity of Circular Cylindrical Shells Laminated of Bimodulus Composite Materials // Journal of Thermal Stresses. 1981. Vol. 4. № 2. P. 155-177.
5. Thermal bending of think rectangular plates of bimodulus composite materials / J. N. Reddy, C. W. Bert, Y. S. Hsu, V. C. Reddy // Journal Mach. eng. sci. 1980. Vol. 22. № 6. P. 297-304.
6. Спасская, М. В. Термомеханическая задача для полой сферической оболочки из материала с усложненными свойствами / М. В. Спасская, А. А. Трещев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2018. – № 5(280). – С. 58-65. – EDN UZLDGM.
7. Ильюшин, А. А. Пластичность. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 271 с.
8. Трещев, А. А. Анизотропные пластины и оболочки из разнородных материалов / А. А. Трещев ; А. А. Трещев ;



- Российская академия архитектуры и строительных наук, Тульский гос. ун-т. – Москва : РААСН, 2007. – ISBN 978-5-7679-0700-2. – EDN QJXOPR.
9. Амбарцумян, С. А. Основные уравнения и соотношения разномодульной теории упругости анизотропного тела / С.А. Амбарцумян // Изв. АН СССР. МТТ. 1969. №3. С. 51–61.
 10. Bert C. W., Reddy J. N., Chao W. C. Bending of Thick Rectangular Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials // AIAA Journal. 1981. Vol. 19. №10. P. 1342–1349.
 11. Bert C. W., Gordaninejad F. Deflection of Thick Beams of Multimodular Materials // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1984. Vol. 20. P. 479–503.
 12. Bert C. W. Bending of Thick Rectangular Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / C. W. Bert, J. N. Reddy, W. C. Chao // AIAA Journal. – 1981. – Vol. 19. – № 10. – P. 1342-1349.
 13. Jones R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Materials // AIAA Journal. 1980. Vol. 18. №8. P. 995–1001.
 14. Трещев, А. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния толстых цилиндрических оболочек из материалов с усложненными свойствами / А. А. Трещев, В. Г. Теличко, П. Ю. Ходорович // Физика и механика материалов. – 2014. – Т. 21, № 1. – С. 38-50. – EDN ULWHWH.
 15. Трещев, А. А. Вариант модели деформирования ортотропных композитных материалов / А. А. Трещев, Ю. А. Завьялова, М. А. Лапшина // Эксперт: теория и практика. – 2020. – № 3(6). – С. 62-68. – DOI 10.24411/2686-7818-2020-10027. – EDN SWJGCO.
 16. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. - М.: Наука, 1974. 446 с.
 17. Петров, В. В. Методы расчета конструкций из нелинейно-деформируемого материала : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 270100 "Строительство" / В. В. Петров, И. В. Кривошеин ; В. В. Петров, И. В. Кривошеин. – Москва : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2009. – 206 с. – ISBN 978-5-93093-627-8. – EDN QJUZOF.
 18. Варвак, П. М. Метод сеток в задачах расчёта строительных конструкций / П. М. Варвак, Л. П. Варвак. – М.: Стройиздат. 1977.
 19. Амбарцумян С. А. Осесимметричная задача круговой цилиндрической оболочки, изготовленной из материала, разносопротивляющегося растяжению и сжатию // Изв. АН СССР. Сер. Механика. 1965. №4. С. 77–85.

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

Статья поступила в редакцию 23.01.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

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

The article was submitted 23.01.2024; approved after reviewing 25.03.2024; accepted for publication 25.03.2024.

Краткое сообщение

УДК 69

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

DOI 10.51608/26867818_2024_1_105

СОВЕТЫ ОПЫТНОГО КОЛЛЕГИ ГЛАВНЫМ ИНЖЕНЕРАМ ПРОЕКТОВ

© Авторы, 2024

SPIN: 8583-1020

ПОДОЛЬСКИЙ Марк Семёнович

кандидат экономических наук; научный руководитель Международной школы Главных инженеров (Главных архитекторов) проектов при Национальной палате инженеров; аудитор систем качества Ассоциации «Русский Регистр», технический эксперт по системе менеджмента качества в проектировании и строительстве TUV-CERT; член Комитета по инжинирингу и малому предпринимательству НОПРИЗ

*Международная школа главных инженеров (главных архитекторов) проектов при Национальной палате инженеров
(Россия, Москва, e-mail: mpodolskii@inbox.ru)*

Жизненный опыт даёт нам радость
только тогда, когда мы можем
передать его другим.

А. Моруа

Опыт учит нас понимать,
что невероятное не всегда ложно.

Ж. Рец

В системе производственно-хозяйственной деятельности проектных организаций (ПО) могут быть ошибки, как в самой проектной документации, так и при организации проектирования, т.е. в работе менеджмента ПО, в том числе Главных инженеров проектов (ГИПов).

Алгоритм действий с первой группой ошибок достаточно хорошо проработан. Есть понимание того, что значение таких ошибок противоречиво. С одной стороны, трата ресурсов на исправление ошибок, увеличение себестоимости проектных работ, уменьшение прибыли ПО, потеря репутации и тому подобное. С другой, – конструктивное управление ошибками – выявление, исправление, анализ и устранение причин - важная составляющая процессов непрерывного улучшения работы ПО, формирования конкурентных преимуществ и, как следствие, – «выживания» ПО в условиях кризиса и устойчивого развития при стабильном рынке. Другими словами, простое уменьшение количества ошибок в проектной документации достигается устранением причин их возникновения. А логический анализ первопричин их появления и извлечение необходимых уроков – это постоянно

действующие инструменты совершенствования работы ПО, в том числе повышения удовлетворенности заказчиков.

Конструктивное управление ошибками, которые относятся к организации процесса проектирования, является основной обязанностью Главных инженеров проектов. Эти ошибки также могут прогнозироваться на основе логического анализа. Это специальная область деятельности, которой, к сожалению, пока ГИПы не занимаются. Чаще ошибки становятся известными из опыта коллег, но только в том случае если коллеги совершив ошибку, придали ей статус ошибки", показали, как её исправить, и доказали, почему неконструктивно "наступать на их грабли".

Ошибка при организации проектирования имеет много последствий. Если ГИП не совершает ошибок, это свидетельствует о его профессиональной эффективности. Он явно держит "порох сухим", а значит получает возможность рисковать, право пробовать новое, совершать ошибки, но уже в новых областях. Такие ошибки в известном смысле полезны, на них мы учимся. Низкий уровень эффективности "извлечения уроков" из этих ошибок



– симптом отсутствия инстинкта выживания, тормоз в карьере.

Ошибки при организации проектирования неизбежны. Даже теоретически невозможно собрать ВСЮ информацию, которая нужна для принятия решения, когда поджимают сроки, меняются внешние условия и т.п. Собирать ВСЮ информацию в таких обстоятельствах – значит потерять возможность вовремя принять само решение. Еще одно обстоятельство влияет на уровень риска при принятии организационных решений. На "входе" процесса находится нормативная информация (Законы, Технические регламенты, Своды правил, СНиПы, ГОСТы, СНи т.п.), которая, во-первых, устанавливает НИЖНЮЮ границу требований, т.е. хуже нельзя, а, во-вторых, к моменту утверждения часто безнадежно устаревает.

Таким образом, в конкурентной среде бездумное точное выполнение требований нормативных документов – источник рисков. Риск принять неверное решение усугубляется ещё и тем, что часть "входной" информации состоит из СТЕРЕОТИПОВ – устоявшихся представлений, которые не рассматриваются критически и принимаются, как данность.

Использование рекомендации опытных коллег позволяет примерно на 70%-80% снизить влияние плохих СТЕРЕОТИПОВ на организационные решения ГИПов.

Впервые я сел за доску проектировщика в далёком 1960 году в проектно-институте "Гипрогрознефть" после окончания факультета "Промышленное и гражданское строительство" Грозненского нефтяного института. И с тех пор занимаюсь проектированием (инженер, Главный инженер проектов). Много лет проработал ГИПом в проектных организациях Сахалина, Тулы и Москвы, занимаясь авторским надзором при строительстве гигантов химической промышленности (Йонавский и Кедайнский заводы по производству удобрений в Литве).

Руководил разработкой, был автором и соавтором нормативных и методических документов по деятельности ГИПов и организации проектирования, а также многочисленных публикаций в профессиональных СМИ по этим вопросам. В течении всей профессиональной деятельности участвовал в повышении квалификации ГИПов (ГАПов), консультировал их по проблемным вопросам проектирования.

Полагаю, что ряд рекомендаций, в основе которых лежит опыт, будут полезны ГИПам. Приведу несколько примеров плохих СТЕРЕОТИПОВ:

Руководить проектированием могут Главный инженер проекта и Главный архитектор проекта одновременно. Руководить проектом должен ОДИН специалист, например, ГИП, тогда у ГАПа будут обязанности главного специалиста – архитектора. И наоборот, если руководить проектом будет ГАП, то у ГИПа будут обязанности главного специалиста-технолога. В частности, в письме Минрегиона РФ от 29.09.2012 № Д26и-2160) сказано,

что "Главный инженер проекта и главный архитектор проекта назначаются *одновременно* (выделено курсивом нами) при проектировании уникальных объектов, а также объектов производственного назначения и объектов инфраструктуры линейных объектов, требующих разработки архитектурного решения. *При этом ответственным за подготовку проектной документации определяется один из них*".

ГИП отвечает за качество проектной (рабочей) документации. Нести ответственность за проектное решение можно ТОЛЬКО в двух случаях: первый – когда специалист сам принял проектное решение, второй – когда он лично проверил проектное решение. Понятно, что ни один ГИП не может принять все проектные решения по объекту проектирования и не может проверить все. Требования к должности или, как сегодня говорят, к "ответственности и полномочиям" ГИПа исторически соотносились с усложнениями требований к объектам проектирования, а также с изменениями ожиданий заказчиков и заинтересованных сторон в отношении результатов проектирования. В прошлом проектированием и строительством руководил один специалист, который принимал все решения. В настоящее время основная задача ГИПа – обеспечение необходимой динамики инвестиций, а также доходов заказчику от реализации проекта, достаточных для компенсации инвесторам вложенных ими ресурсов и взятого на себя риска. Таким образом, ГИП принимает все решения по критерию экономической эффективности проектирования, строительства и эксплуатации объекта и организует процесс проектирования. Отсюда и требования к его квалификации. Все же остальные участники процесса проектирования принимают решения по критерию технической оптимальности, и реализуется это условие в процессе принятия и проверки проектных решений, а также при согласовании проектных решений главными специалистами по разделам проекта.

Если что-то серьезное случится, то первым «посадят» ГИПа. Если произойдет действительно что-то серьёзное, то следовательно, назначив судебно-техническую экспертизу или проведя несколько таких экспертиз, определит того проектировщика, который, например, выполнил расчет конструкции и применил неверный коэффициент, потом определит того, кто проверял расчет, и именно этому человеку предъявит обвинение. Однако суд при определенных обстоятельствах может наказать и исполнителя, и проверяющего. Но в любом случае ГИПа "не посадят"

ГИП должен быть самым квалифицированным проектировщиком по всем разделам проекта. Это невозможно по определению. К сожалению, этим "плохим" стереотипом пытаются пользоваться при назначении на должность ГИПа. Целесообразно решение в этом случае принимать на основе конкурсного отбора и оформлять соответствующим приказом руководителя проектной организации. Критерии конкурсного отбора ГИПа: обоснование



претендентом возможности достижения более высоких технико-экономических показателей проектируемого объекта, сокращения первоначальных сроков проектирования и строительства, сокращения трудоемкости проектных работ, более выгодных для проектной организации условий расчетов с участниками работ, а также расширения состава дополнительных требований заказчика по объекту проектирования и т.п. Особое значение имеет репутация ГИПа: характер, коммуникабельность, исполнительность, обязательность, деловитость, пунктуальность, порядочность, умение договариваться, внимательность, вежливость, отзывчивость, работоспособность и т.п.

Если возникают разногласия между главными специалистами по разделам проектов, то ГИП принимает окончательные решения. Это одно из самых распространенных заблуждений. Давайте представим такую картину: главный специалист – электрик и главный специалист – теплотехник в процессе проектирования не могут прийти к общему мнению относительно того, что должно быть размещено между данными осями здания и на соответствующей отметке. Один считает, что это самое целесообразное место для размещения трансформаторной, а другой – соответственно теплового пункта. Не придя к общему мнению, они

обращаются к ГИПу, который понимает, что, во-первых, профессиональная квалификация каждого главного специалиста выше, чем у него и, во-вторых, они уже пытались договориться, но не смогли. Будет ошибкой ГИПа если он примет решение в пользу одного из них. Следует предъявить основание для такого решения – приведенные экономические затраты на реализацию и эксплуатацию соответствующего варианта. Таким образом ГИП добавит в процесс выбора одного из вариантов проектных решений ещё один критерий – его экономическую целесообразность. Строго говоря, он должен, посоветовать специалистам учесть дополнительный критерий, но не принимать за них решение.

В Методическом документе Консультационного центра Марка ПОДОЛЬСКОГО "ЦНИО-проект" – "125 советов опытного коллеги Главным инженерам проектов "мы попытались привлечь внимание ГИПов к особенностям работы с характерными ошибками при организации процесса проектирования.

Надеюсь, что полезный опыт, отраженный в "Советах", поможет успешному профессиональному становлению начинающих ГИПов и совершенствованию работы опытных. А наличие опыта можно заменить лишь стремлением его приобрести и временем, которое вы на это потратите.

A short message

ADVICES FROM AN EXPERIENCED COLLEAGUE TO CHIEF PROJECT ENGINEERS

© The Author(s) 2024

PODOLSKIY Mark Semyonovich
Candidate of Economic Sciences; Scientific supervisor
National Chamber of Engineers
(Moscow, Russia, E-mail: mpodolskii@inbox.ru)

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»**

(включено в категорию К2 перечня ВАК, пятилетний импакт-фактор в РИНЦ – 0,647)

Сайт: <https://www.expert763.ru/>

Научные специальности:

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.9. – Строительная механика (технические науки);
- 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела (технические и естественные науки)

Размещение статей в сетевом издании платное.

Оплата производится после получения вами **сообщения** о приеме статьи к публикации, после чего автором высылаются скриншот или фото оплаты через Сбербанк-онлайн или через другие банки-онлайн на адрес сетевого издания: expert763@mail.ru

Статью высылать по адресу: expert763@mail.ru

Материалы авторов (соавторов) не имеющих персональной регистрации в БД РИНЦ (SPIN-код, AuthorID) редакцией не рассматриваются, за исключением: если соавтором является доктор наук по специальности ВАК сетевого издания «Эксперт: теория и практика».

Редакция вправе отказать в размещении материалов автору, имеющему низкие наукометрические показатели в БД РИНЦ.

Структурные параметры:

Статья обязательно должна иметь элементы, отвечающие следующим параметрам:

1. Метаданные статьи на русском и английском языках (научная специальность, УДК, DOI, название статьи, знак копирайта (авторского права), **все научные идентификаторы автора**, ФИО автора полностью, должность, организация, адрес организации, личная электронная почта, аннотация и ключевые слова) – **не проверяются на антиплагиат.**

2. Тело статьи:

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

(кратко описывается проблема исследования и значение ее решения)

Анализ последних исследований и публикаций, в которых рассматривались аспекты этой проблемы и на которых обосновывается автор; выделение неразрешенных ранее частей общей проблемы.

(указаны общие тенденции в том, что уже было опубликовано, указано на отдельную проблему или на перспективу развития по данной тематике)

Обосновывается актуальность исследования.

(подтверждена актуальность исследования, указано практическое значение статьи и ее вклад в науку)

МЕТОДОЛОГИЯ

Формирование целей статьи.

(указывается цель статьи)

Используемые методы, методики и технологии.

(а) описание методов, которые вы применяли конкретно для статьи, если теоретическая статья, то выбрать один метод и описать его методологию, теорию, историю, конкретно какие принципы этого метода применяли к данному исследованию;

б) описание этапов эксперимента, в) описание участников эксперимента (возраст, пол, вузы и какие площадки были охвачены)



РЕЗУЛЬТАТЫ

Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов.

- а) раскрыто новшество статьи, описаны авторские наблюдения и результаты;**
- б) представленные результаты соответствуют заявленным целям и задачам статьи;**
- в) описана идея, концепция, методика, которая нашла применение (конкретика);**
- г) представлены результаты в виде таблиц и рисунков - названия таблиц и рисунков отвечают содержанию таблиц и рисунков)**

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение полученных результатов с результатами в других исследованиях.

- а) сравнили различные методы, сравнили результаты исследования с аналогичными в других статьях;**
- б) написали о различиях или сходстве (или и о различиях, и о сходстве);**
- в) сделали разбор и разъяснение результатов;**
- г) сделали обобщение и оценку результатов, сделали оценку достоверности полученных результатов;**
- д) определили место полученных в ходе исследования результатов в структуре известных знаний)**

ВЫВОДЫ

Выводы исследования.

(подводится итог статьи, указываются результаты, к которым пришли в результате проведенного исследования)

Перспективы дальнейших изысканий в данном направлении.

(указываются направления, по которым необходимо провести дальнейшие исследования)

3. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (не проверяется на антиплагиат).

(рекомендуется в списке литературы не менее 15 источников, 5 из которых за последние 5 лет (в 2024 году - это статьи 2020-2024 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
№ 1 (24) 2024 г.

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

Материалы представлены
в авторской редакции
Компьютерная вёрстка и дизайн обложки
А.А. Сорочайкиной
e-mail: anna.sarachai@gmail.com

Подписано для публикации на сайте
<http://expert763.ru> 31.03.2024.
Электронные текстовые данные (14,5 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

The Online Scientific Edition

EXPERT: THEORY AND PRACTICE
№ 1 (24) 2024

Editor-in-Chief -
Murashkin Vasily Gennadievich,
Candidate of Technical Sciences,
INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Signed for publication on the website
<http://expert763.ru> 31.03.2024.
Electronic text data (14.5 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