ISSN 2075-8545 (online)
ASI • CA(pt) • CrossRef • CNKI • DOAJ • EBSCO Publishing • ESCI Web of Science • EZB • eLIBRARY.RU • Google Scholar • HEAL Link
ICI Journals Master List • OAJI • ProQuest • Readera • ResearchBib • ResearchGate • Scopus • Ulrich's Periodicals Directory

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION A Scientific Internet-Journal 2025 • Tom 17 • No. 2
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ научный Интернет-журнал 2025 • Том 17 • № 2



IN THE ISSUE:

В НОМЕРЕ:

- Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods
- Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials
- The photocatalytic activity of cement-sand plaster under the influence of natural solar radiation
- Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene

- Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов
- Распределенная реакционная поверхность углеграфитовых объемно пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и нанокомпозиционных материалов
- Фотокаталитическая активность цементно-песчаной штукатурки под воздействием естественного солнечного излучения
- Синтез самозалечивающихся микрокапсул на основе дициклопентадиена

www.nanobuild.ru **e-mail: info@nanobuild.ru**

ISSUED WITH SUPPORT OF

RUSSIAN ACADEMY OF ENGINEERING
INTERNATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING
WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (CHINA)
BEIJING INSTITUTE OF INTELLECTUAL PROPERTY (CHINA)

ISSN 2075-8545 (online)

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE
НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ

«Nanotechnologies in Construction» is a peer-reviewed journal.
The main aim of the Journal is to provide information support for the process of invention and practical application of science intensive technologies (mostly nanotechnological products) in construction, communal and housing services, joint areas (industry, power et al.).

The main tasks:
- Providing scientists and specialists from different countries with the opportunity to publish the results of their research and receive information about modern technologies and materials, high-performance equipment in construction, communal and housing services, joint areas (industry, power et al.).
- To provide information support and participate in the events (forums, conferences, symposia, workshops, exhibitions,round tables etc) devoted to nanoindustry and problems of application of nanoindustry in construction and housing and communal services, which are perspective and of great importance.

The Journal has been published since 2009. Frequency: bimonthly.

These are the topics of the papers published in the journal: creation of new functional materials; nanostructured systems strength and penetrability formation theory development; the problems of nanomaterials and nanotechnologies implementation in construction and building materials; diagnostics of building systems nanostructures and nanomaterials; technologies aimed at studying nanomaterial properties; technological principles of nanostructures creation (liquid melts, sol and gel synthesis). The topics may be different, directly or indirectly related to the areas mentioned above.

The journal publishes: original papers; reviews; discussing materials, comments, other information materials.

The language of publication: English; Russian.

The edition's readers and authors are:
- students, lecturers, post-graduates and people working for doctor's degree;
- scientists and specialists of research institutes and nanotechnological centers;
- heads and specialists of the institutions, organizations and factories from the sphere of construction and housing and communal services;
- scientists and specialists of the industries which are adjacent to construction;
- experts of the enterprise-producers manufacturing nanoindustrial output.

EDITORS

CHIEF EDITOR – Boris V. GUSEV, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department «Construction Materials and Technologies» Russian University of transport, President of the Russian Academy of Engineering and the International Academy of Engineering, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Laureate of the USSR and the Russian Federation State Prizes, Laureate of 5 Governmental Prizes of the Russian Federation in the field of science and education, Honored Scientist of Russian Federation, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, info-rae@mail.ru

EXECUTIVE EDITORIAL SECRETARY – Vladimir I. VEDENYAPIN, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: pr@nanobuild.ru, info@nanobuild.ru

DEPUTY CHIEF EDITOR – Leonid A. IVANOV, Cand. Sci. (Eng.), Russian Academy of Engineering, International Academy of Engineering, Center for New Technologies «NanoStroitelstvo», Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, l.a.ivanov@mail.ru

EXECUTIVE EDITOR – Yulia A. EVSTIGNEEVA, Member of Russian Association of Journalists, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, evstigneeva.ju@yandex.ru

HEAD OF DESIGN DEPARTMENT – Andrey S. REZNICHENKO, Businessman, Moscow, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, ras77222@yandex.ru

CHIEF FOR FOREIGN RELATIONS – Zhanna V. PISARENKO, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russian Federation
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru, z.pisarenko@spbu.ru

EDITORIAL BOARD

Peter J.M. BARTOS, Prof., Queen's University of Belfast, RILEM Technical Committee TC 197-NCM on Nanotechnology in Construction Materials (2002–2009), Scottish Centre for Nanotechnology in Construction Materials (University of West Scotland), Belfast, UK

Vyacheslav R. FALIKMAN, Dr. (Mater.), Scientific Research Center «Construction», Structural Concrete Association, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), Technical Committee of American Concrete Institute ACI 241 «Nanotechnologies of Concrete», Moscow, Russian Federation

Wenlong BAI, Ph.D., Beijing Institute of Intellectual Property, Beijing, China

Oleg L. FIGOVSKY, Dr. Sci. (Eng.), Israel Polymate research center, Nanotech Industries, Inc., Daly City, California, USA; Migdal HaEmek, Israel

Zhengyi FU, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Wuhan University of Technology, State Key Lab of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan, China

Leonid A. IVANOV, Cand. Sci. (Eng.), Russian Academy of Engineering, International Academy of Engineering, Center for New Technologies «NanoStroitelstvo», Moscow, Russian Federation

Sergei V. KALIUZHNIY, Dr. Sci. (Chem.), Prof., RUSNANO, Moscow, Russian Federation

Vadim G. KHOZIN, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Kazan State University of Architecture and Engineering, Department «Technology of Construction Materials, Products and Structures», Kazan, Russian Federation

Evgeniy V. KOROLEV, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Vice Rector for Research, Saint Petersburg, Russian Federation

Leonid M. LYNKOV, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarussian State University ofInformatics and Radioelectronics, Department «Information Security», Minsk, Belarus

Polad MALKIN, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Ben-Gurion University in the Negev, StartUpLab, Beer-Sheva, Israel

Viktor S. MECHTCHERINE, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Technical University of Dresden, Institute of Construction Materials, Dresden, Germany

Surendra P. SHAH, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

Vladimir Y. SHEVCHENKO, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Institute of Silicate Chemistry named after I.V. Grebenshchikov of Russian Academy of Sciences, Coordinating Council on Development of Nanotechnologies attached to the Committee of the Council of the Federation of the Federal Assembly of the RF on Science, Culture, Education, Medicine and Ecology, Saint-Petersburg, Russian Federation

Pawel SIKORA, Ph.D., Asssociate Professor, West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Department of General Civil Engineering, Szczecin, Poland

Konstantin G. SOBOLEV, Prof., University of Wisconsin-Milwaukee, Technical Committee of American Concrete Institute ACI 241 «Nanotechnologies of Concrete», Milwaukee, Wisconsin, USA

Valeriy I. TELICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Larisa A. URKHANOVA, Dr. Sci. (Eng.), Prof., East-Siberian State University of Technologies and Management, Department «Production of Building Materials and Wares», Ulan-Ude, Russian Federation

Rongming WANG, Ph.D., Prof., Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, School of Mathematics and Physics University of Science and Technology Beijing, Beijing Key Laboratory for Magneto-Photoelectrical Composite and Interface Science, Beijing, China

Li D. XU, Ph.D., Prof., Old Dominion University, of Information Technologies & Decision Sciences Department; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Norfolk, Virginia, USA

The Journal is registered as an independent mass media in the Ministry of Communication and Mass Media of the Russian Federation. (Registration Certificate Эл № ФС77 – 35813 of 31 March 2009 issued by the Federal Service on Supervision in the Sphere of Connection and Mass Communications).

Founder and Publisher – Center for New Technologies «Nanostroitel'stvo», Korolev, Moscow region, Russian Federation
Contacts: e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

Address of edition: Russian Federation, 125009, Moscow, Gazetny per., bld. 9, str. 4
Contacts: e-mail: info@nanobuild.ru

Website: http://nanobuild.ru/

Release date of № 2 Vol. 17 is 19.04.2025

ISSUED WITH SUPPORT OF

RUSSIAN ACADEMY OF ENGINEERING

INTERNATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING

WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (CHINA)

BEIJING INSTITUTE OF INTELLECTUAL PROPERTY (CHINA)

NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: A Scientific Internet-Journal 2025 • Vol. 17 • No. 2
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

CONTENTS

PUBLISHER INFORMATION 106

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Govryakov I.S.
Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods 109

Koshev A.N., Kuzina V.V.
Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials 119

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Okanov D.A., Bryantsev A.A., Niyetbay S.E., Bozkurt M.B., Moldamuratov Zh.N.
Determination of the effective parameters of a triangular corrugated web for crane runway beams 132

Alenov K.T., Bessimbayev Y.T., Bissenov K.A., Shadkam A.S., Niyetbay S.E., Moldamuratov Zh.N.
Modelling and efficiency assessment of vertically reinforced slab foundation of multi-storey building foundation 151

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION

Wuhan University of Technology 173

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS AND SCIENTISTS RESEARCH

Dudareva M.O., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Borisenkov N.S.
The photocatalytic activity of cement-sand plaster under the influence of natural solar radiation 179

APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION

Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Ruchiy A.Yu., Serebryakov S.V., Barinov R.A.
Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene 189

SYSTEM SOLUTIONS FOR TECHNOLOGICAL PROBLEMS

Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Bochektueva E.B., Baldanov A.B., Ivanov R.P.
Development of armored products made from multilayer composite plates 201

PUBLISHING ETHICS 210

AUTHOR GUIDELINES 214

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: НАУЧНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ЖУРНАЛ
NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

ISSN 2075-8545 (online)

«Нанотехнологии в строительстве» – рецензируемый научный журнал.
Основной целью журнала является информационное обеспечение процесса создания и внедрения в мире наукоемких технологий (прежде всего – нанотехнологической продукции) в области строительства, жилищно-коммунального хозяйства, смежных отраслей (промышленности, энергетики и др.).

Основные задачи:
- Предоставление ученым и специалистам из разных стран возможности публиковать результаты своих исследований и получать информацию о современных технологиях и материалах, высокоэффективном оборудовании в области строительства, жилищно-коммунального хозяйства, смежных отраслей (промышленности, энергетики и др.).
- Информационная поддержка и участие в мероприятиях (форумах, конференциях, симпозиумах, семинарах, выставках, круглых столах и т.д.) по наноиндустрии и прикладным вопросам нанотехнологий в области строительства и жилищно-коммунального хозяйства, имеющих актуальное и перспективное практическое значение.

Журнал издается с 2009 года. Периодичность – 6 номеров в год.

В журнале публикуются работы по следующим темам: создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.

Журнал принимает к публикации: оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, другие информационные материалы.

Язык издания: русский; английский.

Авторами и читателями издания являются:
- студенты, преподаватели, аспиранты и докторанты вузов;
- ученые и специалисты научно-исследовательских институтов и нанотехнологических центров;
- руководители и специалисты учреждений, организаций и предприятий строительного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства;
- ученые и специалисты смежных со строительством отраслей;
- эксперты фирм-производителей продукции наноиндустрии.

РЕДАКЦИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – ГУСЕВ Борис Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии» Российского университета транспорта, президент Российской инженерной академии и Международной инженерной академии, член-корреспондент РАН, лауреат Государственных премий СССР и РФ, 5-ти премий Правительства РФ в области науки и образования, заслуженный деятель науки РФ, г. Москва, Российская Федерация
Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, info-rae@mail.ru

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ РЕДАКЦИИ – ВЕДЕНЯПИН Владимир Иванович, г. Москва, Российская Федерация
Контакты: e-mail: pr@nanobuild.ru, info@nanobuild.ru

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА – ИВАНОВ Леонид Алексеевич, канд. техн. наук, Российская инженерная академия, Международная инженерная академия, Центр новых технологий «НаноСтроительство», г. Москва, Российская Федерация
Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, l.a.ivanov@mail.ru

ШЕФ-РЕДАКТОР – ЕВСТИГНЕЕВА Юлия Анатольевна, член Союза журналистов России, г. Москва, Российская Федерация
Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, evstigneeva.ju@yandex.ru

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА ДИЗАЙНА И ВЕРСТКИ – РЕЗНИЧЕНКО Андрей Сергеевич, индивидуальный предприниматель, г. Москва, Российская Федерация
Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, ras77222@yandex.ru

РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ПО ВНЕШНИМ СВЯЗЯМ – ПИСАРЕНКО Жанна Викторовна, д-р экон. наук, профессор кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru, z.pisarenko@spbu.ru

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Питер Дж. М. БАРТОШ, профессор, Королевский Университет Белфаста, Технический комитет по нанотехнологиям в строительных материалах РИЛЕМ (2002–2009 гг.), Шотландский центр по нанотехнологиям в строительных материалах (Университет Западной Шотландии), г. Белфаст, Великобритания

ФАЛИКМАН Вячеслав Рувимович, д-р материаловедения, Научно-исследовательский центр «Строительство», ассоциация «Железобетон», Международный союз экспертов и лабораторий по испытанию строительных материалов, систем и конструкций (РИЛЕМ), технический комитет Американского института бетона ACI 241 «Нанотехнологии в бетоне», г. Москва, Российская Федерация

БАЙ Вэньлун, д-р философии, Пекинский институт интеллектуальной собственности, г. Пекин, Китай

ФИГОВСКИЙ Олег Львович, д-р техн. наук, Израильский исследовательский центр Polymate, Nanotech Industries, Inc., г. Дейли-Сити, Калифорния, США; г. Мигдаль-ха-Эмек, Израиль

Фу ДЖЕНЬИ, д-р техн. наук, профессор, Уханьский технологический университет, Государственная главная лаборатория передовых технологий для синтеза и обработки материалов, г. Ухань, Китай

ИВАНОВ Леонид Алексеевич, канд. техн. наук, Российская инженерная академия, Международная инженерная академия, Центр новых технологий «НаноСтроительство», г. Москва, Российская Федерация

КАЛЮЖНЫЙ Сергей Владимирович, д-р хим. наук, профессор, ОАО «РОСНАНО», г. Москва, Российская Федерация

ХОЗИН Вадим Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра «Технологии строительных материалов, изделий и конструкций», г. Казань, Российская Федерация

КОРОЛЁВ Евгений Валерьевич, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, проректор по научной работе, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ЛЫНЬКОВ Леонид Михайлович, д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра «Защита информации», г. Минск, Беларусь

МАЛКИН Полад, д-р ф.-м. наук, Университет Бен-Гуриона в Негеве, StartUpLab, г. Беэр-Шева, Израиль

МЕЩЕРИН Виктор Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Дрездена, Институт строительных материалов, г. Дрезден, Германия

СУРЕНДРА П. Шах, д-р техн. наук, профессор, Северо-Западный Университет, г. Эванстон, Иллинойс, США

ШЕВЧЕНКО Владимир Ярославович, д-р хим. наук, профессор, Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Координационный совет по развитию нанотехнологий при Комитете Совета Федерации ФС РФ по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

СИКОРА Павел, доктор наук, Западно-Поморский технологический университет, факультет гражданского и экологического строительства, факультет общего гражданского строительства, г. Щецин, Польша

СОБОЛЕВ Константин Геннадиевич, профессор, Университет Висконсин-Милуоки, технический комитет Американского института бетона ACI 241 «Нанотехнологии в бетоне», г. Милуоки, Висконсин, США

ТЕЛИЧЕНКО Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация

УРХАНОВА Лариса Алексеевна, д-р техн. наук, профессор, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, кафедра «Производство строительных материалов и изделий», г. Улан-Удэ, Российская Федерация

ВАН Жунмин, д-р философии, профессор, Пекинский Центр передовых инноваций в области геномной инженерии материалов, Школа математики и физики Пекинского университета науки и технологий, Пекинская ключевая лаборатория магнито-фотоэлектрических композитов и интерфейсов, г. Пекин, Китай

СЮЙ ЛИ ДА, д-р философии, профессор, Университет Олд Доминион, Отдел информационных технологий; Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE), г. Норфолк, Вирджиния, США

Журнал зарегистрирован как самостоятельное средство массовой информации в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации (свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77 – 35813 от 31 марта 2009 г.).

Учредитель и издатель – ООО «Центр Новых Технологий «Наностроительство», г. Королев, Московская область, Российская Федерация
Контакты: e-mail: l.a.ivanov@mail.ru

Адрес редакции: Российская Федерация, 125009, г. Москва, Газетный пер., дом 9, стр. 4
Контакты: e-mail: info@nanobuild.ru; **Сайт:** http://nanobuild.ru/

Дата выхода в свет № 2, Том 17, 2025: 19.04.2025 г.

ИЗДАЕТСЯ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

РОССИЙСКОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ

МЕЖДУНАРОДНОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ АКАДЕМИИ

УХАНЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ТЕХНОЛОГИЙ (КИТАЙ)

ПЕКИНСКОГО ИНСТИТУТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ (КИТАЙ)

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: научный Интернет-журнал 2025 • Том 17 • № 2

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ 106

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Говряков И.С.
Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов 109

Кошев А.Н., Кузина В.В.
Распределенная реакционная поверхность углеграфитовых объемно пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и нанокомпозиционных материалов 119

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Оканов Д.А., Брянцев А.А., Бозкурт М.Б., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н.
Определение эффективных параметров треугольной гофрированной стенки подкрановых балок 132

Аленов К.Т., Бесимбаев Е.Т., Бисенов К.А., Шадкам А.С., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н.
Моделирование и оценка эффективности вертикально армированного основания плитного фундамента многоэтажного здания 151

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Уханьский технологический университет 173

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Дударева М.О., Козлова И.В., Земскова О. В., Борисенков Н.С.
Фотокаталитическая активность цементно-песчаной штукатурки под воздействием естественного солнечного излучения 179

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Черкашина Н.И., Павленко В.И., Ручий А.Ю., Серебряков С.В., Баринов Р.А.
Синтез самозалечивающихся микрокапсул на основе дициклопентадиена 189

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Бочектуева Е.Б., Балданов А.Б., Иванов Р.П.
Разработка бронированных изделий из многослойных композиционных пластин 201

ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА 210

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 214

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118

CC BY 4.0

Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods

Igor V. Bessonov[1], **Alexey D. Zhukov**[1, 2], **Ekaterina Yu. Bobrova**[3], **Elina A. Gorbunova**[1, 2*], **Ilya S. Govryakov**[1, 2]

[1] Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia
[2] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
[3] National Research University of Higher School of Economics, Moscow, Russia

* Corresponding author: e-mail: eg15082000@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The solution to problems aimed at improving the efficiency of construction is closely linked to the use of lightweight mineral materials, which include mineral fibres, foam glass, cold-curing cellular glass, cellular concrete, and foam gypsum. **Methods and materials.** The aim of the research is to study the influence of technological factors on the properties of foam gypsum, as well as on the features of the formation of its structure and optimization of its compositions. The basis of the methodology is digital methods of planning, processing results, and their analytical optimization. **Results.** Based on the analysis of statistical information, it is established that the optimal composition is the one that includes the consumption of dihydrate gypsum of 76.6 kg/m^3, the consumption of the polymerizing component of 9.8 kg/m^3, and the consumption of the aqueous solution of the foaming agent of 80 kg/m^3. This composition corresponds to a softening coefficient of 0.40–0.42; the compressive strength of foam gypsum is 0.75 MPa, and the average density is 320 kg/m^3. **Discussion.** The properties of foam gypsum are determined by its macro- and microporosity, as well as the structure of the interpore partitions. The presence of connecting pores, as well as the crystalline structure of the interpore partition, makes the material permeable to vapour-air mixtures, which is a positive factor for acoustic materials. **Conclusion.** This material can be used for the production of individual products, as well as in low-rise construction of houses using frame-sheathing technology.

KEYWORDS: lightweight materials, thermal conductivity, foam gypsum, modified gypsum binder, digital optimization

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out as part of the research work on the topic of the Federal Research Institute of the Russian Academy of Natural Sciences No. 3.1.2.1 "Development of the theoretical foundations for the production of particularly light inorganic building materials and the study of the effect of porous structure on their thermophysical and acoustic characteristics", carried out on behalf of the Ministry of Construction of Russia. Part of the research was carried out at the National Research University MSUCE as part of the implementation of the University's Development Program "PRIORITY" 2030. Project 3.1 "Scientific breakthrough in the construction industry – new technologies, new materials, new methods".

FOR CITATION:
Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):109–118. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118. – EDN: WXZIJJ.

© Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Govryakov I.S., 2025

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов

Игорь Вячеславович Бессонов[1], **Алексей Дмитриевич Жуков**[1, 2], **Екатерина Юрьевна Боброва**[3], **Элина Александровна Горбунова**[1, 2*], **Илья Сергеевич Говряков**[1, 2]

[1] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
[3] Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: eg15082000@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Решение задач, направленных на повышение эффективности строительства, непосредственно связано с применением минеральных особолегких материалов, к которым относят минераловолокнистые материалы, пеностекло, ячеистое стекло холодного отверждения, ячеистые бетоны и пеногипс. **Методы и материалы.** Целью исследований, изложенных в статье, являлось изучение влияния технологических факторов на свойства пеногипса, а также на особенности формирования его структуры и оптимизация его составов. Основой методологии стали цифровые методы планирования, обработки результатов и аналитической их оптимизации. **Результаты.** На основе анализа статистической информации установлено, что оптимальным является состав, включающий расход двуводного гипса 76,6 кг/м^3; расход полимеризующегося компонента 9,8 кг/м^3; расход водного раствора пенообразователя 80 кг/м^3. Этому составу соответствует коэффициент размягчения 0,40–0,42; прочность при сжатии пеногипса 0,75 МПа, средняя плотность 320 кг/м^3. **Обсуждение.** Свойства пеногипса определяются его макро- и микропористостью, а также структурой межпоровых перегородок. Наличие соединяющихся пор, а также кристаллическая структура межпоровой перегородки делает материал проницаемым для паровоздушных смесей, что является положительным для акустических материалов фактором. **Заключение.** Этот материал может использоваться для изготовления штучных изделий, а также в малоэтажном строительстве домов по каркасно-обшивной технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: особолегкие материалы, теплопроводность, пеногипс, модифицированное гипсовое вяжущее, цифровая оптимизация

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования проводились в рамках реализации научно-исследовательской работы по теме ФНИ РААСН № 3.1.2.1 «Развитие теоретических основ получения особолёгких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», выполняемой по заданию Минстрой России. Часть исследований выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):109-118. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118. – EDN: WXZIJJ.

INTRODUCTION

Lightweight materials (LWM) are used in the process of implementing systems both related to thermal insulation of building structures and in acoustic systems: sound-absorbing or sound-insulating. Materials of this group can be divided into two main subgroups: LWM based on foamed polymers and LWM based on mineral components. The first subgroup includes polystyrene foam, extruded polystyrene foam, polyurethane foam, polyisocyanurate foam, and polyethylene foam. Products based on foamed plastics are produced in the form of slabs (less often in the form of half-cylinders or segments). Polyethylene foam is produced in the form of mats or rolls. A special feature of products made of polyethylene foam is the possibility of manufacturing seamless insulating shells [1–3]. The second group includes mineral fiber and cellular mineral materials: foam glass, cold-curing cellular glass, as well as foam gypsum and heat-insulating cellular concrete. Foam glass undergoes a pyroplastic state during the formation of its structure and is used to manufacture either individual products (blocks, slabs, shaped pieces) or crushed stone [4–6]. Materials based on mineral binders harden under natural conditions, and therefore the manufacture of products based on them is a less energy-intensive process [7–9].

In general, the basis of the properties of lightweight materials are their structure, determined by porosity,

which can reach 98% for foamed plastics and 82–86% for mineral-based materials. Cellular structure materials are of the greatest scientific and practical interest. Firstly, these are foamed plastics (polystyrene foam and polyolefin foam) obtained by extrusion; secondly, their non-combustible analogues: foam glass, cellular glass, foam gypsum, and heat-insulating cellular concrete.

There are five main types of structure (four of which are shown in Fig. 1, and a mixed one in Fig. 3): closed-cell or closed; open-cell or open; mixed; integral; and syntactic. Closed porosity is characteristic of extruded foam plastics; mixed porosity is characteristic of mineral lightweight materials [2, 5].

The common characteristics of these materials are a high degree of cellular porosity and, consequently, low average density. The average density of lightweight materials should not exceed 400 kg/m³. Such properties of LWM as thermal conductivity, water absorption, sound absorption and sound insulation are associated with low average density and structural features. The main and fundamental difference is the flammability of materials based on foamed polymers (with the release of toxic substances in some cases) and the non-flammability of LWM based on a formed mineral matrix.

Digital methods based on digital modelling and the use of statistical methods to plan experiments and process their results are useful for both studying technological processes and solving prescription problems. It is worth paying attention to the appeal of digital methods for optimizing and interpreting the results of experiments. In particular, methods of analytical optimization and the formation of models using methods of differential analysis and vector algebra [10–12].

The aim of the research presented in the article was to study the influence of technological factors on the properties of foam gypsum, as well as on the features of the formation of its structure and optimization of its compositions. The basis of the methodology was digital meth-

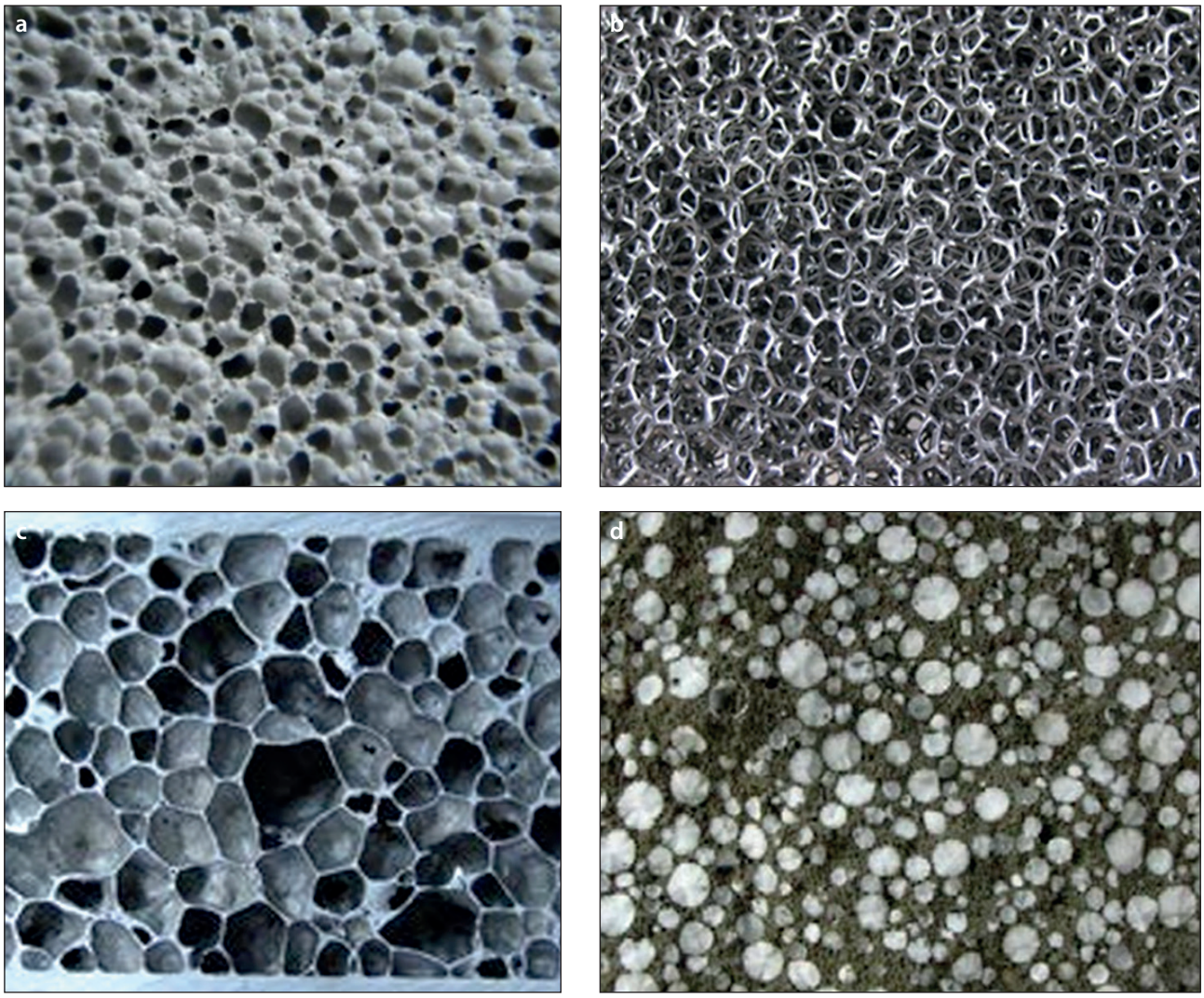


Fig. 1. Porosity structure of lightweight materials: a – closed-cell; b – open-pore; c – integral; d – syntactic

ods of planning, processing results, and their analytical optimization.

METHODS AND MATERIALS

Short setting times and low water resistance significantly limit the possibilities of using gypsum-containing materials. The directions for optimizing the properties of gypsum binders are the introduction of mineral additives containing components that exhibit pozzolanic activity, as well as the modification of gypsum stones with polymerizing substances. To make LWM from gypsum or modified gypsum binders, one must mix the mineral matrix with stable foams or fill it with gas [13, 14]. This procedure opens up the pores in the material. The experiment was designed based on statistical methods for planning and processing its results. The following were adopted as variable factors: the consumption of dihydrate gypsum (X_1); the polymerizing component (X_2); and the consumption of an aqueous solution of the foaming agent (X_3). The consumption of semi-hydrate gypsum, the main component of the gypsum binder, remained constant in the experiments. The conditions for preparing foam and foamed gypsum were equal in all cases: foam multiplicity, stability, and viability of the freshly prepared foamed mass. In particular, the foam multiplicity, stability and viability of the freshly prepared foam mass were constant. Part of the research was carried out on the equipment of the Center for Collective Use (CCU) NRU MSUCE.

$У_1$, as a response function, provides the strength of the foam gypsum samples after 7 days of hardening. The average density of the foam gypsum is given by $У_2$. The softening coefficient of the foam gypsum samples obtained from climate tests is given by $У_3$. The experimental conditions are given in Table 1.

The Statistika program was used to process the results of the experiments. Statistical hypotheses were also tested, and confidence intervals were found to see how important the regression equation coefficients were. In the end, regression equations were made for the foam gypsum's compressive strength ($У_1$), its average density ($У_2$), and its softening coefficient ($У_3$). Confidence intervals were determined for strength $\Delta b_1 = 0.02$ MPa, for average density $\Delta b_2 = 4$ kg/m³, and for softening coefficient $\Delta b_3 = 0.008$. The obtained models were tested for adequacy according to the Fisher criterion. They found that the Fisher criteria values for the compressive strength model $F_1 = 16.2$, the average density model $F_2 = 15.9$, and the softening coefficient model $F_3 = 15.1$ are the same as the values in the table. This means that the models are correct.

The following mathematical models (polynomials) were obtained:

– for compressive strength

$$У_1 = 0{,}69 + 0{,}05X_1 + 0{,}04X_2 - 0{,}08X_3 - 0{,}03X_1^2; \quad (1)$$

– for medium density:

$$У_2 = 282 + 28X_1 + 11X_2 - 81X_3 + 9X_1X_2; \quad (2)$$

– for the softening coefficient:

$$У_3 = 0{,}34 + 0{,}01X_1 + 0{,}04X_2 - 0{,}02X_3 + 0{,}01X_1X_2. \quad (3)$$

RESULTS AND DISCUSSION

We looked at the equation coefficients for a constant amount of semi-aqueous gypsum use and found that the amount of foaming agent used (coefficient at X_3 is minus 0.08) has the most significant effect on the compression strength of foam gypsum ($У_1$), making it weaker. The effect of the consumption of dihydrate gypsum is not unambiguous, which is emphasized by the coefficients at factor $X_1 = 0.05$ and at factor X_{12} is minus 0.03. This result enables further use of the analytical optimization method. Increasing the consumption of the polymerizing component in the intervals provided by the experimental conditions contributes to an increase in strength (coefficient at X_2 equal to 0.04).

One of the most important factors that affects the average density of foam gypsum ($У_2$) is how much of the foaming agent is used (the coefficient at X_3 is minus 81); other factors and how they interact with each other have a smaller effect. The increase in the softening coefficient ($У_3$) is largely determined by the increase in the consumption of the polymerizing component (the coefficient at X_2 equal to 0.04); the influence of the consumption of

Table 1. Experimental conditions

Factor	Symbol X_i	Average value of the factor, X_i	Variation interval, ΔX_i	Factor values at levels	
				–1	+1
Consumption of dihydrate gypsum Cg, kg/m³	X_1	60	20	40	80
Consumption of polymerizing component Cp, kg/m³	X_2	8	2	6	10
Consumption of aqueous solution of foaming agent C_{fa}, kg/m³	X_3	80	20	60	100

dihydrate gypsum and the aqueous consumption of the foaming agent is manifested to a lesser extent.

In the context of further implementation of the digital methodology, the analytical optimization method is used and tested in the study of various processes for building materials production and solving prescription problems [1, 2, 9, 11]. This method consists of the sequential implementation of the following stages: determination of the optimal value of the factor X_1 in formalized and natural form; obtaining optimized functions (1–3), implementation of interpretative solutions, and verification of the reliability of the obtained results.

1) Determining the optimal value of factor X_1

$$\partial Y_1/X_1 = 0.05 - 0.06X_1 = 0 \rightarrow X_1 = 0.05/0.06 = 0.83.$$

By using the information in Table 1, we can figure out the best way to use dihydrate gypsum. Pg = 60 + 20 × 0.83 = 76.6 kg/m³.

2) We perform optimization of functions (1-3) under their conditions $X_1 = 0.83$:

– For compressive strength
$Y_1 = 0{,}69 + 0{,}05\times(0{,}83) + 0{,}04X_2 - 0{,}08X_3 - 0{,}03\times(0{,}83)^2$.

– For medium density:
$Y_2 = 282 + 28\times(0{,}83) + 11X_2 - 81X_3 + 9\times(0{,}83)X_2$.

– For the softening coefficient:
$Y_3 = 0{,}35 + 0{,}01\times(0{,}83) + 0{,}04X_2 - 0{,}02X_3 + 0{,}01\times(0{,}83)X_2$.

As a result, we obtained the following optimized dependencies:

– for compressive strength
$Y_1 = 0{,}71 + 0{,}04X_2 - 0{,}08X_3$. (4)

– For medium density:
$Y_2 = 305 + 18X_2 - 81X_3$. (5)

– For the softening coefficient:
$Y_3 = 0{,}35 + 0{,}05X_2 - 0{,}02X_3$. (6)

3) We implement interpretive solutions

We interpret the results by constructing graphical dependencies based on optimized models (4–6) and then combining these graphs into a nomogram.

The nomogram (Fig. 2) includes three sectors. In sector I, the relationship between the average density of foam gypsum and the consumption of the polymerizing component, as well as the aqueous solution of the foaming agent, is established with an optimized consumption of dihydrate gypsum equal to 76.6 kg/m³. In the second sector, the dependence of the compressive strength on the same factors is established. In the third sector, the dependence of the softening coefficient on the same factors is established.

Fig. 2 shows the implementation of the direct problem of digital modelling, which involves predicting a material's properties based on specified values of variable factors, with red lines. The order of implementing the direct problem is as follows. We set (at the optimal value of the consumption of dihydrate gypsum equal to 76.6 kg/m³) the consumption of the polymerizing component and the aqueous solution of the foaming agent; for example, 8.5 and 7.5, respectively. In the corresponding sectors on the coordinate axes, we mark the specified values of the consumptions and draw straight lines parallel to the coordinate axes. In sector I, at the intersection of the lines, we determine the average density (in this case, it is equal to 308 kg/m³). In sector II, we similarly determine the compressive strength (equal to 0.76 MPa). In sector III, we determine the softening coefficient. We find the intersection point between the straight line of the consumption of the aqueous solution and the polymer consumption line (Pc). From the intersection point, we drop a perpendicular to the ordinate axis and determine the softening coefficient (equal to 0.348).

The solution to the inverse problem of choosing the optimal value of factors according to the optimization parameter is implemented in the process of checking the reliability of the results obtained from the optimized functions (4–6).

4) Verification of the reliability of the obtained results

The reliability of the data obtained as a result of working with the models is checked using the optimization parameter, which is the softening coefficient of foam gypsum. The calculated values are obtained from the polynomial (6) and are entered into column 5 of Table 2. Next, mixtures of the designed compositions are prepared, foam gypsum samples are made, and after 7 days of hardening, their compressive strength is determined. Then they are kept in a humid environment, the strength of the wet samples is determined, and the experimental values of the softening coefficient are calculated. The results are entered in Column 6. The relative difference between the calculated and experimental values is determined (column 7 is formed), and the compositions that correspond to the best indicators for the softening coefficient are selected.

In this case, compositions No. 4 and 5 have the highest softening coefficient. Using polynomials (4 and 5), we determine the strength and average density of foam gypsum. Based on the strength and average density indicators, we select composition No. 5 (compressive strength 0.75 MPa, average density 320 kg/m³). Consumption of dihydrate gypsum is 76.6 kg/m³; consumption of the polymerising component is 9.8 kg/m³; consumption of an aqueous solution of foaming agent is 80 kg/m³.

The macro- and microstructure of ultra-light mineral materials largely determines their properties. Firstly, this

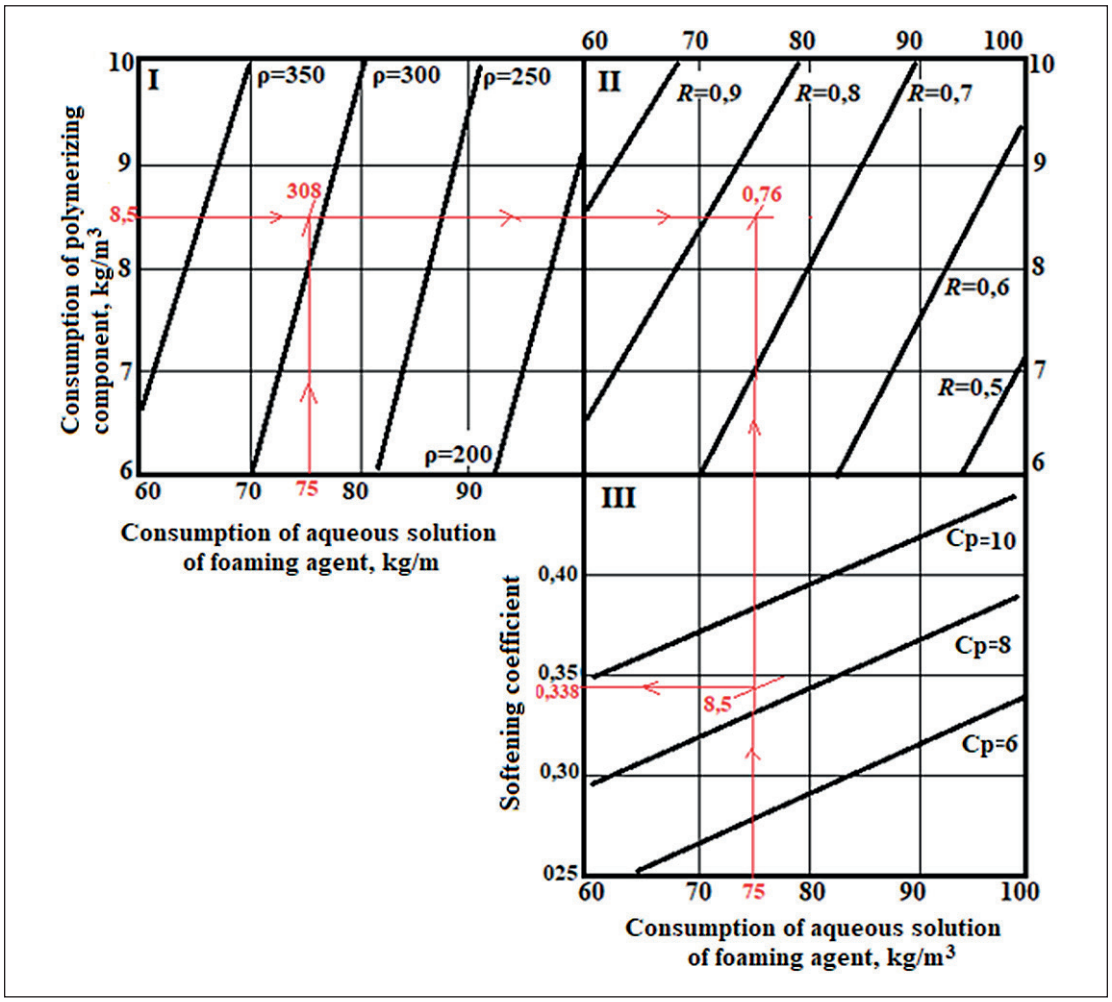


Fig. 2. Nomogram for predicting the properties of foam gypsum with an optimized consumption of dihydrate gypsum equal to 76.6 kg/m³.

Table 2. Verification of the reliability of calculated values with an optimized consumption of dihydrate gypsum equal to 76.6 kg/m³

No.	Consumption, kg/m³		Softening coefficient values		
	Polymerizing component	Aqueous solution of foaming agent	Calculated	Experimental	Δ, %
1	2	3	5	6	7
1	8.2	62	0,37	0.36	2.7
2	8.2	80	0.35	0.36	2.7
3	9.8	98	0.38	0.36	5.3
4	**9.8**	**62**	**0.42**	**0.43**	**2, 4**
5	**9.8**	**80**	**0.40**	**0.42**	**5.0**
6	6.2	98	0.28	0,30	7.1
7	6.2	80	0.30	0.32	6, 7
8	6.2	62	0.38	0.36	5.3

is the average pore size (cells) and the distribution of pores by size. Secondly, the nature of porosity: communicating or closed. Thirdly, the density of intercellular partitions, as well as the density and topography of their surface. Based on the location and structure of the pores of foam gypsum, one can conclude that the porosity is predominantly communicating. The distribution of pores by size groups is not traced in the studied fragment of the sample. In Fig. 3, closed macropores are marked in yellow; the average size varied from 150 to 400 μm.

Orange color indicates through pores forming a system of open porosity; the average size on the studied fragment was 40–170 μm. Through pores are located in the body of macropores. The surface of the pores is predominantly torn and loose.

In general, the structure of foam gypsum is partially closed macropores and macropores with through porosity, consisting of intergrowths of gypsum crystals (Fig. 4). The average sizes of typical gypsum crystals were (13–18) × (1.1–2.0) μm (average sizes of the maximum and minimum sides of the crystal). The needle-like shape of individual gypsum crystals is clearly visible.

Gypsum-containing materials are used mainly in dry rooms. The reason for this is that the strength of gypsum-based products in general and foam gypsum in particular depends a lot on how wet the material is [13–15]. In this regard, it is important to study the drying mechanism of foam gypsum samples at different temperatures. The experiment was carried out on foam gypsum samples measuring 50×50×50 mm.

The experiment indicated that the samples absorb moisture during the first 30 minutes, and when they are kept in water for up to 2 hours, their moisture content increases slightly. The test results are shown in Fig. 5.

Analyzing the results, we can conclude that the drying of foam gypsum occurs most intensely at positive temperatures. At negative temperatures, drying takes place, but the process slows down significantly. This becomes especially relevant given the possible areas of application of foam gypsum as a filling material in building structures (Fig. 6).

The use of modified foam gypsum in the construction of low-rise buildings has a number of technological advantages. Firstly, the construction of enclosing structures allows one to do without lifting mechanisms (Fig. 5). Secondly, various methods of sheathing frame walls become possible. In particular, it becomes possible to use chrysotile cement sheets, chipboard, or orientated strand boards and their analogues as permanent formwork.

The use of lightweight materials based on modified foam gypsum as thermal insulation allows for an increase in the comfort of the indoor microclimate. Given the low thermal conductivity of foam gypsum and the monolithic nature of the fill, it becomes possible to form seamless

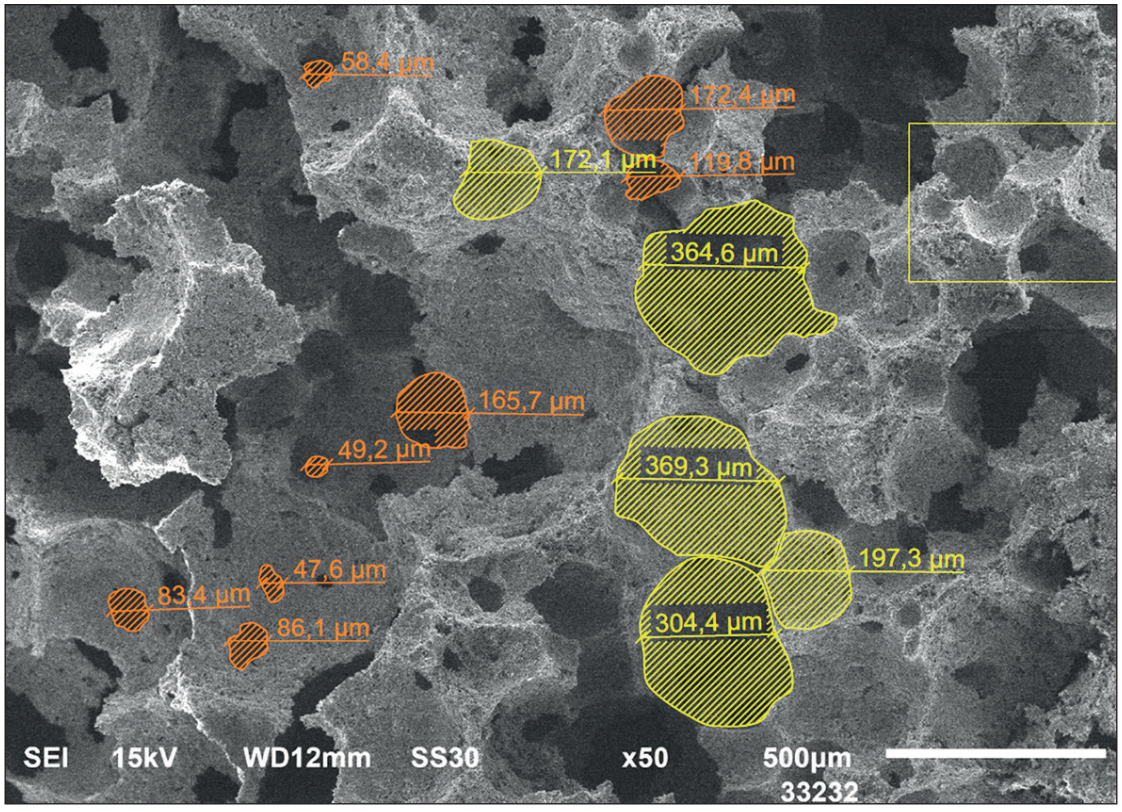


Fig. 3. General view of the pore structure of foam gypsum

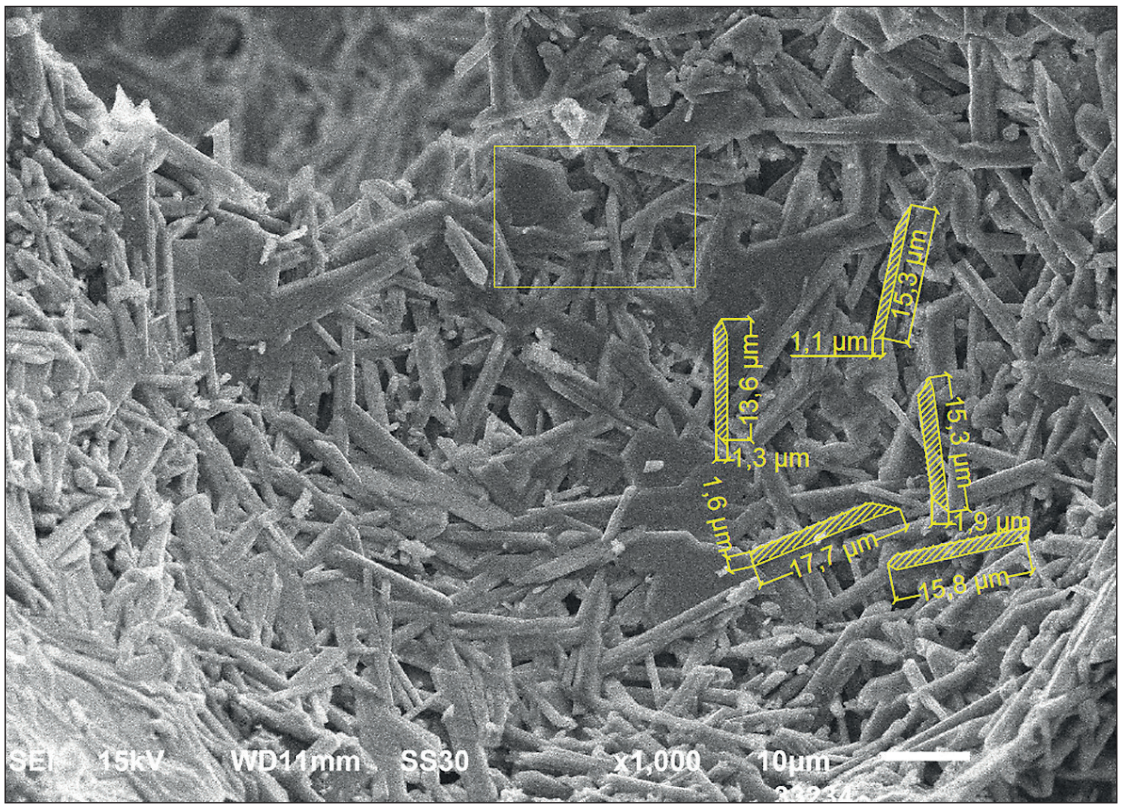


Fig. 4. Structure of the interpore partition

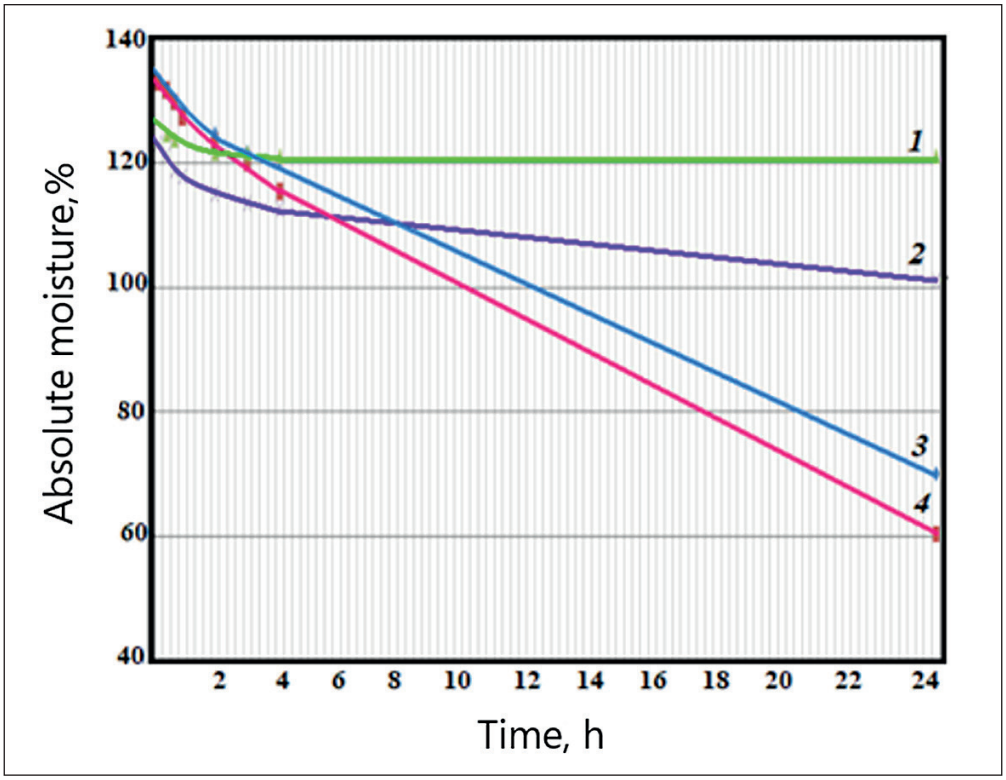


Fig. 5. Dynamics of drying of foam gypsum samples with an average density of 320 kg/m^3 at temperatures, °C:
1 – minus 11; 2 – minus 5; 3 – 20; 4 – 50

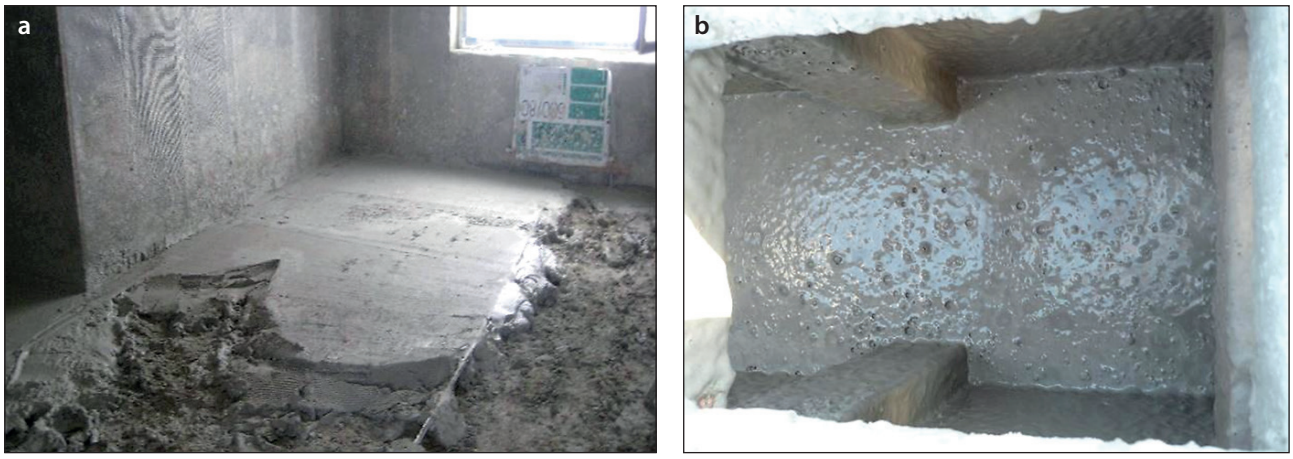


Fig. 6. Using foam gypsum as a filling material: a – filling the ceiling with foam gypsum mixture; b – foam gypsum mixture placed in the voids of frame-sheathing walls [8]

insulating shells, which to some extent allows to solve problems related to energy consumption.

CONCLUSION

Lightweight materials are a large group of materials based on foamed polymers or based on mineral composites, which include foam glass, cold-curing foam glass, aerated concrete (D100-300), foam gypsum, and foam gypsum based on a modified binder.

Mineral lightweight building materials, and in particular foam gypsum, are classified as non-flammable and environmentally friendly materials, which significantly increases their attractiveness both from the point of view of fire safety and from the point of view of increasing comfortable conditions in the premises, as well as reducing the negative impact on the environment.

The properties of foam gypsum are directly determined by its structure both at the macro level and at the micro level. Self-organization of the microstructure of gypsum, forming intercellular partitions, allows obtaining crystalline systems that have partial permeability for vapor-air mixtures, which has a positive effect on the sorption characteristics of the material and allows recommending it for interior decoration not only from the standpoint of its acoustic characteristics but also as products that provide regulation of the level of air pollution in rooms.

We can recommend modified foam gypsum for making one-of-a-kind items (for indoor use) and for using as a heat-insulating material in low-rise homes made of frame-sheathing structures, bricks, and small blocks because its performance characteristics have already been measured.

REFERENCES

1. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings. *Polymers*. 2021; 13(21):3698; https://doi.org/10.3390/polym13213698

2. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bessonov I.V., Bobrova E.Y., Pshunov T.A., Dotkulov K.T. Modified Polyethylene Foam for Critical Environments. *Polymers*. 2022;(14):4688. https://doi.org/10.3390/polym14214688

3. Lesovik V.S. Building materials. Present and future. *Bulletin of MGSU*. 2017;12(1):9-16.

4. Qu X., et al., Novel glass foam with microwave absorption properties obtained from waste glass, C, and Fe_2O_3. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023; 601: 122069. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.122069

5. Kosenko E.A. Nature-like materials and structures in mechanical engineering. Monograph. E.A. Kosenko, N.I. Baurova, V.A. Zorin. Moscow: MADI; 2020. (In Russ.)

6. Puchka, O.V. The use of highly efficient foam glass insulation for thermal insulation of enclosing structures, buildings and structures. *Glass of the world*. 2011;2:62-64 (In Russ.)

7. Miryuk O.A. Cellular materials based on liquid glass. *Universum: Technical sciences: electron. scientific Journal*. 2015;4-5(17) (in Russ.)

8. Lotov V.A., Khabibulin Sh.A. The use of modified liquid glass binder in the production of building materials. *Building materials*. 2015;1:72-75. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-721-1-72-75 (in Russ.)

9. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gorbunova E.A., Govryakov I.S., Gudkov P.K., Bogomolova L.K. Forecasting the water resistance of highly porous material based on liquid glass. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2024;2: 90-99 (In Russ.)

10. Bessonov Igor, Pilipenko Anton, Medvedev Andrey, Besfamilnaya Valeria Mathematical method for modeling the properties of cellular structures. *AIP Conference Proceedings.* 2497, 040016. 2023. https://doi.org/10.1063/5.0106365

11. *Energy efficiency of building systems*. /A.D. Zhukov, E.Y. Bobrova, I.V. Bessonov, E.A. Mednikova. Moscow: INFRA-M; 2023. https://doi.org/110.12737/1856852

12. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. Modeling the structure of highly porous materials. *Housing construction*. 2024;6:36-42. https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42 (In Russ.)

13. Bessonov I.V., Buryanov A.F. Foam gypsum in modern low-rise construction. *Housing Construction*. 2024;5:26-34. https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34 (In Russ.)

14. Otman A.S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Vasheva S.V. Features of structure formation of composite gypsum binders with a complex of mineral and organic additives. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2023;4:24-33. (In Russ.)

15. Buryanov A.F., Fischer H.B., Korovyakov V.F., Galtseva N.A., Buldyzhova E.N. Anhydrite binder modified with a complex additive for dry building mixes. *Building materials*. 2022; 8:36-40. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-36-40 (in Russ.)

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Bessonov – Cand. Sci. (Eng.), Chief Researcher at the Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia, bessonoviv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9234-4075

Alexey D. Zhukov – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Materials Science at the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Senior Researcher at the Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia, lj211@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0593-3259

Ekaterina Yu. Bobrova – Cand. Sci. (Econ.), Advisor to the Director of the Institute of Construction and Housing and Communal Services of the State Academy of Investment Specialists of the National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia, mla-gasis@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6541-4552

Elina A. Gorbunova – Postgraduate Student of the Department of Building Materials Science at the National Research Moscow State University of Civil Engineering, Senior Engineer at the Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, eg15082000@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7241-4136

Ilya S. Govryakov – Postgraduate student at the Department of Building Materials Engineering of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, a leading engineer at the Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, govr190@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8327-9980

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Igor V. Bessonov – scientific guidance, development of the research concept, development of methodology, final conclusions.

Alexey D. Zhukov – development of the research concept, development of methodology and its adaptation to research tasks, writing of the source text, and final conclusions.

Ekaterina Yu. Bobrova – development of methodology, revision of the text, final conclusions.

Elina A. Gorbunova – performing the practical part of the research, editing the text.

Ilya S. Govryakov – performing the practical part of the research, editing the text.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 07.03.2025; approved after reviewing 05.04.2025; accepted for publication 08.04.2025.

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья / Original article
УДК 696-405.8
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118

CC BY 4.0

Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов

Игорь Вячеславович Бессонов[1], **Алексей Дмитриевич Жуков**[1, 2], **Екатерина Юрьевна Боброва**[3], **Элина Александровна Горбунова**[1, 2*], **Илья Сергеевич Говряков**[1, 2]

[1] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
[3] Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: eg15082000@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Решение задач, направленных на повышение эффективности строительства, непосредственно связано с применением минеральных особолегких материалов, к которым относят минераловолокнистые материалы, пеностекло, ячеистое стекло холодного отверждения, ячеистые бетоны и пеногипс. **Методы и материалы.** Целью исследований, изложенных в статье, являлось изучение влияния технологических факторов на свойства пеногипса, а также на особенности формирования его структуры и оптимизация его составов. Основой методологии стали цифровые методы планирования, обработки результатов и аналитической их оптимизации. **Результаты.** На основе анализа статистической информации установлено, что оптимальным является состав, включающий расход двуводного гипса 76,6 кг/м^3; расход полимеризующегося компонента 9,8 кг/м^3; расход водного раствора пенообразователя 80 кг/м^3. Этому составу соответствует коэффициент размягчения 0,40–0,42; прочность при сжатии пеногипса 0,75 МПа, средняя плотность 320 кг/м^3. **Обсуждение.** Свойства пеногипса определяются его макро- и микропористостью, а также структурой межпоровых перегородок. Наличие соединяющихся пор, а также кристаллическая структура межпоровой перегородки делает материал проницаемым для паровоздушных смесей, что является положительным для акустических материалов фактором. **Заключение.** Этот материал может использоваться для изготовления штучных изделий, а также в малоэтажном строительстве домов по каркасно-обшивной технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: особолегкие материалы, теплопроводность, пеногипс, модифицированное гипсовое вяжущее, цифровая оптимизация

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования проводились в рамках реализации научно-исследовательской работы по теме ФНИ РААСН № 3.1.2.1 «Развитие теоретических основ получения особолёгких неорганических строительных материалов и исследование влияния пористой структуры на их теплофизические и акустические характеристики», выполняемой по заданию Минстрой России. Часть исследований выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Оптимизация свойств и структуры особолегких материалов с применением цифровых методов. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):109–118. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118. – EDN: WXZIJJ.

© Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Горбунова Э.А., Говряков И.С., 2025

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods

Igor V. Bessonov[1], Alexey D. Zhukov[1, 2], Ekaterina Yu. Bobrova[3], Elina A. Gorbunova[1, 2*], Ilya S. Govryakov[1, 2]

[1] Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia
[2] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
[3] National Research University of Higher School of Economics, Moscow, Russia

* Corresponding author: e-mail: eg15082000@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The solution to problems aimed at improving the efficiency of construction is closely linked to the use of lightweight mineral materials, which include mineral fibres, foam glass, cold-curing cellular glass, cellular concrete, and foam gypsum. **Methods and materials.** The aim of the research is to study the influence of technological factors on the properties of foam gypsum, as well as on the features of the formation of its structure and optimization of its compositions. The basis of the methodology is digital methods of planning, processing results, and their analytical optimization. **Results.** Based on the analysis of statistical information, it is established that the optimal composition is the one that includes the consumption of dihydrate gypsum of 76.6 kg/m^3, the consumption of the polymerizing component of 9.8 kg/m^3, and the consumption of the aqueous solution of the foaming agent of 80 kg/m^3. This composition corresponds to a softening coefficient of 0.40–0.42; the compressive strength of foam gypsum is 0.75 MPa, and the average density is 320 kg/m^3. **Discussion.** The properties of foam gypsum are determined by its macro- and microporosity, as well as the structure of the interpore partitions. The presence of connecting pores, as well as the crystalline structure of the interpore partition, makes the material permeable to vapour-air mixtures, which is a positive factor for acoustic materials. **Conclusion.** This material can be used for the production of individual products, as well as in low-rise construction of houses using frame-sheathing technology.

KEYWORDS: lightweight materials, thermal conductivity, foam gypsum, modified gypsum binder, digital optimization

ACKNOWLEDGMENTS: The research was carried out as part of the research work on the topic of the Federal Research Institute of the Russian Academy of Natural Sciences No. 3.1.2.1 "Development of the theoretical foundations for the production of particularly light inorganic building materials and the study of the effect of porous structure on their thermophysical and acoustic characteristics", carried out on behalf of the Ministry of Construction of Russia. Part of the research was carried out at the National Research University MSUCE as part of the implementation of the University's Development Program "PRIORITY" 2030. Project 3.1 "Scientific breakthrough in the construction industry – new technologies, new materials, new methods".

FOR CITATION:
Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Optimization of properties and structure of lightweight materials using digital methods. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):109–118. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-109-118. – EDN: WXZIJJ.

ВВЕДЕНИЕ

Особолегкие строительные материалы (ОСМ) применяются в процессе реализации систем связанных с тепловой изоляцией как строительных конструкций, так и акустических систем: звукопоглощающих или звукоизоляционных. Материалы этой группы можно разделить на две основные подгруппы: ОСМ на основе вспененных полимеров и ОСМ на основе минеральных компонентов. К первой подгруппе относят пенополистирол, экструзионный пенополистирол, пенополиуретан, пенополиизоцианурат, пенополиэтилен. Изделия на основе вспененных пластмасс выпускают в виде плит (реже в виде полуцилиндров или сегментов). Пенополиэтилен выпускают в виде матов или рулонов. Особенностью изделий из пенополиэтилена является возможность изготовления бесшовных изоляционных оболочек [1–3]. Ко второй группе относят минераловолокнистые и ячеистые минеральные материалы: пеностекло, ячеистое стекло холодного отверждения, а также пеногипс, теплоизоляционный ячеистый бетон. Пеностекло при формировании структуры проходит стадию пиропластического состояния, и на его основе изготавливаются либо штучные изделия (блоки, плиты, фасонные), либо щебень [4–6]. Материалы на основе минеральных вяжущих твердеют в естественных условиях и поэтому изготовление изделий на их основе является менее энергоемким процессом [7–9].

В общем случае основой свойств особолегких материалов является их структура, определяемая пористостью, которая может достигать 98% у вспененных пластмасс и 82–86% у материалов на минеральной основе. Наибольший научный и практический интерес представляют собой материалы ячеистой структуры. Во-первых, это вспененные пластмассы (пенополистирол и пенополиолефины), получаемые экструзией; во-вторых, их негорючие аналоги: пеностекло, ячеистое стекло, пеногипс и теплоизоляционный ячеистый бетон.

Различают пять основных типов структуры (четыре из которых показаны на рис. 1, а смешанная на рис. 3): закрытопористая или замкнутая; открытопористая или открытая; смешанная; интегральная; синтактная. Для экструзионных вспененных пластмасс характерной является замкнутая пористость; для минеральных особолегких материалов – смешанная пористость [2, 5].

Общими характеристиками этих материалов является высокая степень ячеистой пористости и, следовательно, низкая средняя плотность. Средняя плотность особолегких материалов не должна превышать 400 кг/м^3. С низкой средней плотностью и особенностями структуры связаны такие свойства ОСМ, как теплопроводность, водопоглощение, звукопоглощение и звукоизоляция. Главным и принципиальным отличием является горючесть материалов на основе вспененных полимеров (с выделением в некоторых случаях токсичных веществ) и негорючесть ОСМ на основе сформированной минеральной матрицы.

Эффективным инструментом как исследования технологических процессов, так и решения рецептурных задач являются цифровые методы, основан-

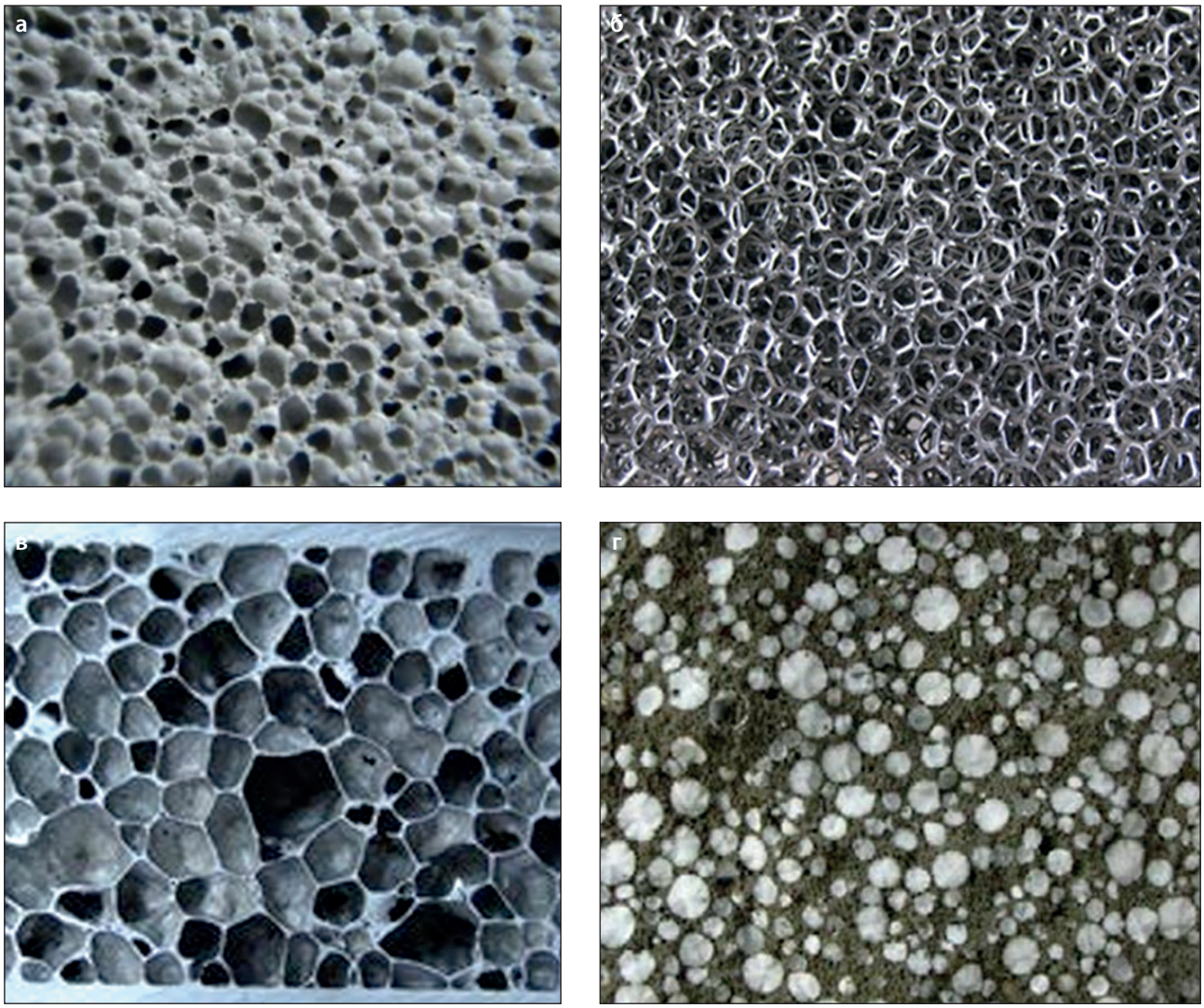


Рис. 1. Структура пористости особолегких материалов: а – закрытопористая; а – открытопористая; в – интегральная; г – синтактная

ные на цифровом моделировании, на использовании статистических методов при планировании экспериментов и обработки их результатов. Заслуживает внимание обращение к цифровым методикам при оптимизации и интерпретации результатов экспериментов. В частности, методики аналитической оптимизации и формирования моделей с помощью методов дифференциального анализа и векторной алгебры [10–12].

Целью исследований, изложенных в статье, являлось изучение влияние технологических факторов на свойства пеногипса, а также на особенности формирования его структуры и оптимизация его составов. Основой методологии стали цифровые методы планирования, обработки результатов и аналитической их оптимизации.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Короткие сроки схватывания и низкая водостойкость существенно ограничивают возможности применения гипсосодержащих материалов. Направлениями оптимизации свойств гипсового вяжущего являются введение минеральных добавок, содержащих компоненты, проявляющих пуццолановую активность, а также модификация гипсового камня полимеризующимися веществами. Получение ОСМ на основе гипсового или модифицированного гипсового вяжущего достигается поризацией минеральной матрицы за счет смешивания со стойкими пенами или насыщения материала газом [13, 14].

Эксперимент был построен на основе статистических методов планирования и обработки его результатов. В качестве варьируемых факторов приняты: расход двуводного гипса (X_1), расход полимеризующегося компонента (X_2) и расход водного раствора пенообразователя (X_3). Расход полуводного гипса (основного компонента гипсового вяжущего) в экспериментах не изменялся. Условия приготовления пены и пеногипса во всех случаях были равными. В частности, постоянными были кратность пены, стабильность и жизнеспособность свежеприготовленной вспененной массы. Часть исследований проводилась на оборудовании Центра коллективного пользования (ЦКП) НИУ МГСУ.

В качестве функции отклика приняты прочность пеногипса через 7 суток твердения образцов ($У_1$), средняя плотность пеногипса ($У_2$), в качестве параметра оптимизации – коэффициент размягчения образцов пеногипса по результатам климатических испытаний ($У_3$). Условия эксперимента приведены в табл. 1.

Обработка результатов эксперимента осуществлялась в программе Statistika, там же проверялись статистические гипотезы и определялись доверительные интервалы для оценки значимости коэффициентов уравнений регрессии. В результате получены уравнения регрессии для прочности при сжатии пеногипса ($У_1$), их средней плотности ($У_2$) и коэффициента размягчения ($У_2$). Определены доверительные интервалы: для прочности $\Delta b_1 = 0{,}02$ МПа, для средней плотности $\Delta b_2 = 4$ кг/м^3, для коэффициента размягчения $\Delta b_3 = 0.008$. Полученные модели проверены на адекватности по критерию Фишера. Расчетные значения критериев Фишера равны для модели прочности при сжатии $F_1 = 16.2$, для средней плотности $F_2 = 15.9$ и для модели для коэффициента размягчения $F_3 = 15.1$ и меньше табличных значений, поэтому модели приняты адекватными.

Получены следующие математические модели (полиномы):

– для прочности при сжатии:

$$У_1 = 0{,}69 + 0{,}05X_1 + 0{,}04X_2 - 0{,}08X_3 - 0{,}03X_1^2; \quad (1)$$

– для средней плотности:

$$У_2 = 282 + 28X_1 + 11X_2 - 81X_3 + 9X_1X_2; \quad (2)$$

– для коэффициента размягчения:

$$У_3 = 0{,}34 + 0{,}01X_1 + 0{,}04X_2 - 0{,}02X_3 + 0{,}01X_1X_2. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ коэффициентов уравнения при постоянном расходе полуводного гипса показывает, что на прочность при сжатии пеногипса ($У_1$) наиболь-

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Наименование фактора	Символ X_i	Среднее значение фактора, X_i	Интервал варьирования, ΔX_i	Значения фактора на уровнях	
				–1	+1
Расход двуводного гипса, кг/м^3	X_1	60	20	40	80
Расход полимеризующегося компонента, кг/м^3	X_2	8	2	6	10
Расход водного раствора пенообразователя, кг/м^3	X_3	80	20	60	100

шее влияние оказывает расход пенообразователя (коэффициент при X_3, равный минус 0,08) и прочность снижается. Влияние расхода двуводного гипса неоднозначно, что подчеркивают коэффициенты при факторе X_1, равный 0,05, и при X_1^2, равный минус 0,03. Этот результат позволяет в дальнейшем использовать метод аналитической оптимизации. Увеличение расхода полимеризующегося компонента в интервалах, предусмотренных условиями эксперимента, способствует повышению прочности (коэффициент при X_2, равный 0,04).

Средняя плотность пеногипса ($У_2$) в наибольшей степени определяется расходом водного раствора пенообразователя (коэффициент при X_3, равный минус 81), влияние остальных факторов, равно как и их парного взаимодействия, проявляется в меньшей степени. Увеличение коэффициента размягчения ($У_3$) в значительной степени определяется увеличением расхода полимеризующегося компонента (коэффициент при X_2, равный 0,04), влияние расхода двуводного гипса и водного расхода пенообразователя проявляются в меньшей степени.

В рамках дальнейшей реализации цифровой методики используется метод аналитической оптимизации, опробованный при исследовании различных процессов производства строительных материалов и при решении рецептурных задач [1, 2, 9, 11]. Этот метод заключается в последовательной реализации следующих этапов: определение оптимального значения фактора X_1 в формализованном и натуральном виде; получение оптимизированных функций (1–3), реализация интерпретационных решений и проверка достоверности полученных результатов.

1) Определение оптимального значения фактора X_1

$$\partial У_1/X_1 = 0.05 - 0.06X_1 = 0 \rightarrow X_1 = 0.05/0.06 = 0.83.$$

Используя данные табл. 1, определяем оптимальный расход двуводного гипса в натуральном выражении: Рг = 60 + 20×0,83 = 76,6 кг/м³.

2) Осуществляем оптимизацию функций (1–3) их условия X_1 = 0,83:

– для прочности при сжатии:
$$У_1 = 0{,}69 + 0{,}05\times(0{,}83) + 0{,}04X_2 - 0{,}08X_3 - 0{,}03\times(0{,}83)^2;$$

– для средней плотности:
$$У_2 = 282 + 28\times(0{,}83) + 11X_2 - 81X_3 + 9\times(0{,}83)X_2;$$

– для коэффициента размягчения:
$$У_3 = 0{,}35 + 0{,}01\times(0{,}83) + 0{,}04X_2 - 0{,}02X_3 + 0{,}01\times(0{,}83)X_2.$$

В результате получаем следующие оптимизированные зависимости:

– для прочности при сжатии:
$$У_1 = 0{,}71 + 0{,}04X_2 - 0{,}08X_3; \quad (4)$$

– для средней плотности:
$$У_2 = 305 + 18X_2 - 81X_3; \quad (5)$$

– для коэффициента размягчения:
$$У_3 = 0{,}35 + 0{,}05X_2 - 0{,}02X_3. \quad (6)$$

3) Осуществляем интерпретационные решения

Интерпретация результатов осуществляется построением графических зависимостей на основе оптимизированных моделей (4–6) с последующим объединением этих графиков в номограмму.

Номограмма (рис. 2) включает три сектора. В секторе I устанавливается зависимость между средней плотностью пеногипса и расходами полимеризующегося компонента, а также водного раствора пенообразователя при оптимизированном расходе двуводного гипса, равном 76,6 кг/м³. Во втором секторе устанавливается зависимость прочности при сжатии от тех же факторов. В третьем секторе устанавливается зависимость коэффициента размягчения от тех же факторов.

Реализация прямой задачи цифрового моделирования, заключающейся в прогнозировании свойств материала в зависимости от заданных значений варьируемых факторов, представлена на рис. 2 красными линиями. Порядок реализации прямой задачи следующий. Задаем (при оптимальном значении расхода двуводного гипса, равном 76,6 кг/м³) расходы полимеризующегося компонента и водного раствора пенообразователя; например, соответственно 8,5 и 7,5. В соответствующих секторах на осях координат отмечаем заданные значения расходов и проводим прямые линии, параллельные осям координат. В секторе I на пересечении прямых определяем среднюю плотность (в данном случае она равна 308 кг/м³). В секторе II определяем аналогично прочность при сжатии (равна 0,76 МПа). В секторе III определяем коэффициент размягчения. Находим точку пересечения между прямой расхода водного раствора и линией расхода полимера (Рп). Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на ось ординат и определяем коэффициент размягчения (равен 0,348).

Решение обратной задачи выбора оптимального значения факторов по параметру оптимизации реализуется в процессе проверки достоверности результатов, полученных из оптимизированных функций (4–6).

4) Проверка достоверности полученных результатов

Проверка достоверности полученных в результате работы с моделями данных осуществляется по параметру оптимизации, в качестве которого

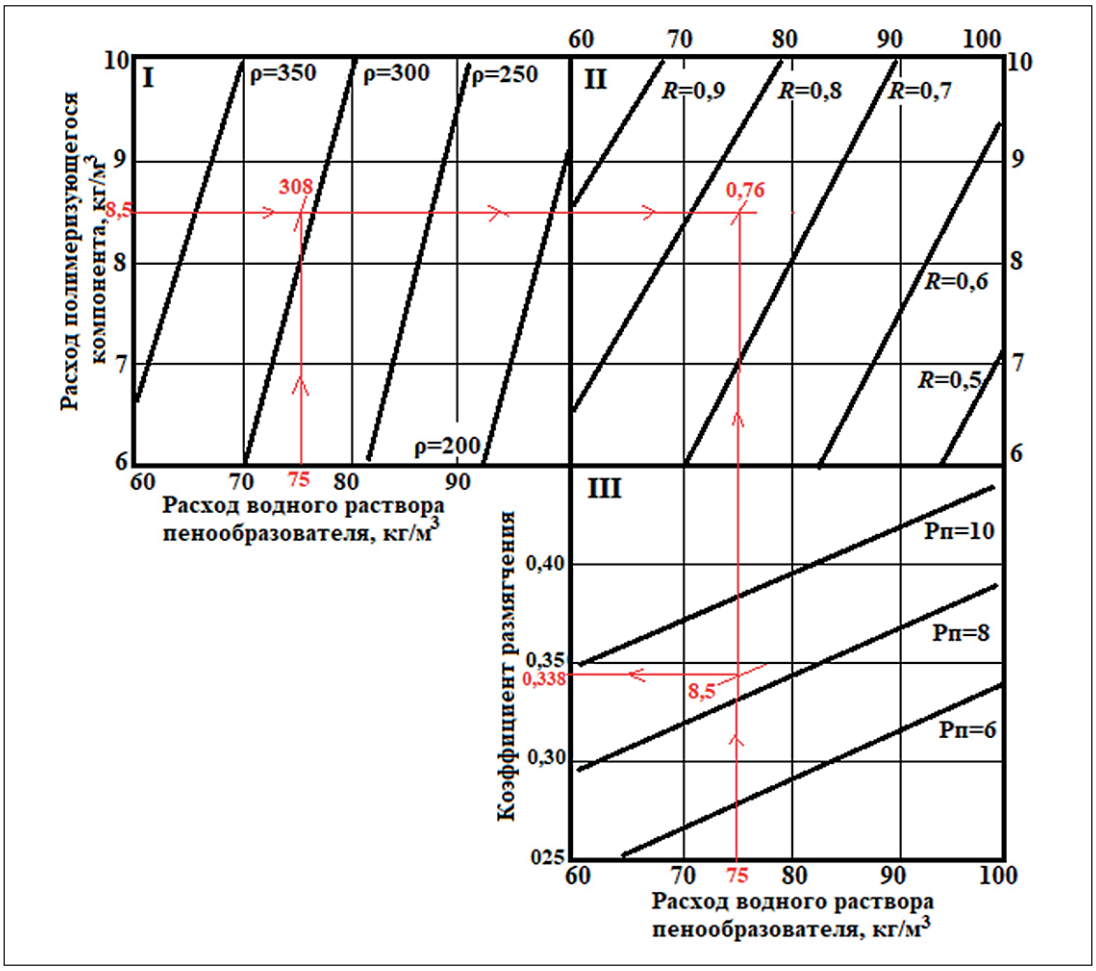


Рис. 2. Номограмма для прогнозирования свойств пеногипса при оптимизированном расходе двуводного гипса, равном 76,6 кг/м^3.

принят коэффициент размягчения пеногипса. Расчетные значения получают из полинома (6) и заносят в столбец 5 табл. 2. Далее готовят смеси проектируемых составов, изготавливают образцы пеногипса и после 7 суток твердения определяют их прочность при сжатии, далее выдерживают во влажной среде, определяют прочность влажных образцов и рассчитывают экспериментальные значения коэффициента размягчения. Результаты заносят в столбец 6. Определяют относительную разницу между расчетными и экспериментальным значениями (формируют столбец 7) и выбирают составы, которым соответствуют наилучшие показатели по коэффициенту размягчения.

В данном случае наибольший коэффициент размягчения имеют составы № 4 и 5. С использованием полиномов (4 и 5) определяем прочность и среднюю плотность пеногипса. По показателям прочности и средней плотности выбираем состав № 5 (прочность при сжатии 0,75 МПа, средняя плотность 320 кг/м^3). Расход двуводного гипса 76,6 кг/м^3; расход полимеризующегося компонента 9,8 кг/м^3; расход водного раствора пенообразователя 80 кг/м^3.

Свойства особолегких минеральных материалов во многом определяются их макро- и микроструктурой. Во-первых, это средний размер пор (ячеек) и распределение пор по размерам. Во-вторых, характер пористости: сообщающаяся или замкнутая. В-третьих, плотность межъячейковых перегородок, а также плотность и топография их поверхности. По расположению и структуре пор пеногипса можно сделать вывод о преимущественно сообщающейся пористости. На исследуемом фрагменте образца не прослеживается распределение пор по размерным группам. На рис. 3 желтым цветом обозначены замкнутые макропоры, средний размер варьировался от 150 до 400 мкм. Оранжевым цветом обозначены сквозные поры, образующие систему открытой пористости, средний размер на исследуемом фрагменте составлял 40–170 мкм. Сквозные поры находятся в теле макропор. Поверхность пор преимущественно рваная, рыхлая.

Таблица 2. Проверка достоверности расчетных значений при оптимизированном расходе двуводного гипса, равном 76,6 кг/м³

№ п/п	Расход, кг/м³		Значения коэффициента размягчения		
	Полимеризующегося компонента	Водного раствора пенообразователя	Расчетные	Экспериментальные	Δ, %
1	2	3	5	6	7
1	8,2	62	0,37	0,36	2,7
2	8,2	80	0,35	0,36	2,7
3	9,8	98	0,38	0,36	5,3
4	**9,8**	**62**	**0,42**	**0,43**	**2,4**
5	**9,8**	**80**	**0,40**	**0,42**	**5,0**
6	6,2	98	0,28	0,30	7,1
7	6,2	80	0,30	0,32	6,7
8	6,2	62	0,38	0,36	5,3

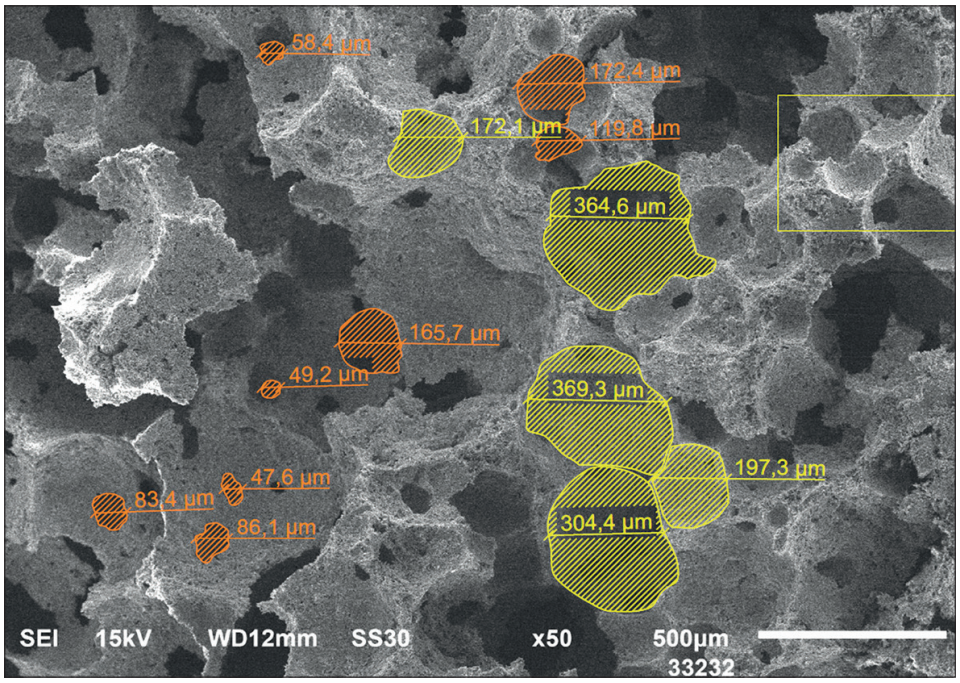


Рис. 3. Общий вид структуры пор пеногипса

В общем виде структура пеногипса представляет собой частично закрытые макропоры и макропоры со сквозной пористостью, состоящие из сростков кристаллов гипса (рис. 4). Средние размеры типовых кристаллов гипса составили (13–18)×(1,1–2,0) мкм (средние размеры максимальной и минимальной стороны кристалла). Отчетливо прослеживается игольчатая форма отдельных кристаллов гипса.

Гипсосодержащие материалы применяют в основном в сухих помещениях. Это связано с тем, что прочностные характеристики гипсосодержащих изделий вообще и пеногипса в частности в значительной степени зависят от влажности материала [13–15]. В связи с этим является значимым изучение механизма сушки пеногипсовых образцов при различных температурах. Эксперимент проводили на образцах пеногипса размерами 50×50×50 мм.

В эксперименте установлено, что образцы набирают влагу в течение первых 30 минут, а при дальнейшем их выдерживании в воде до 2-х часов увеличивают свое влагосодержание незначительно. Результаты испытаний приведены на рис. 5.

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что сушка пеногипса наиболее интенсивно происходит при положительных температурах. При отрицательных высыхание имеет место, но процесс значительно

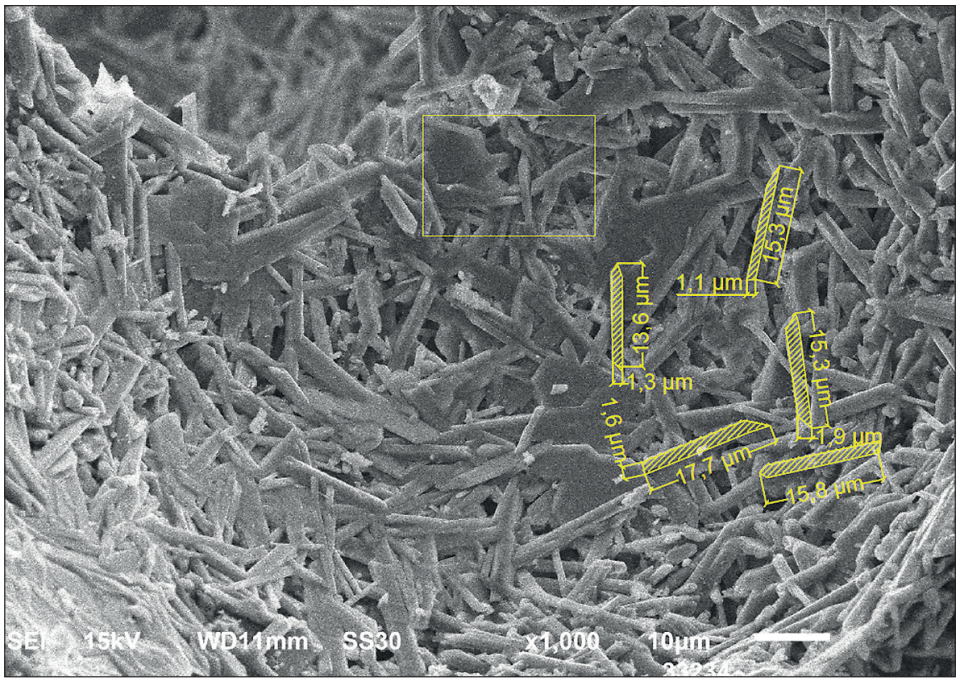


Рис. 4. Структура межпоровой перегородки

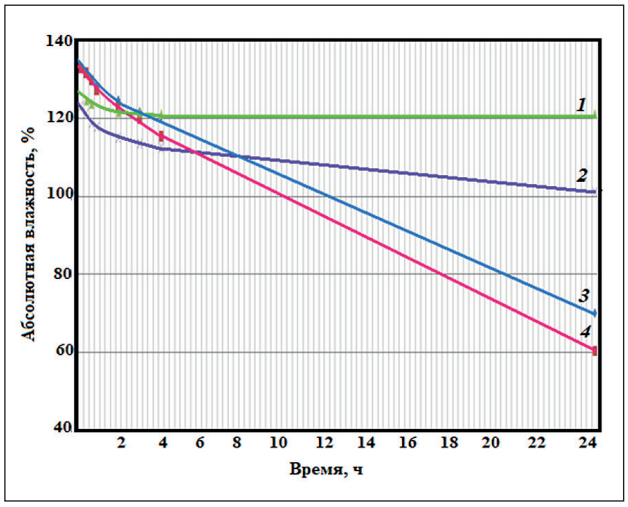


Рис. 5. Динамика сушки пеногипсовых образцов средней плотностью 320 кг/м^3 при температурах, °С: 1 – минус 11; 2 – минус 5; 3 – 20; 4 – 50

замедляется. Это становится особенно актуальным с учетом возможных областей применения пеногипса как заливочного материала в строительных конструкциях (рис. 6).

Использование модифицированного пеногипса при строительстве малоэтажных зданий имеет ряд технологических преимуществ. Во-первых, возведение ограждающих конструкций позволяет обходиться без грузоподъемных механизмов (рис. 5). Во-вторых, становятся возможными различные способы обшивки каркасных стены. В частности, в качестве несъемной опалубки становится возможным применение хризотилцементных листов, древесностружечных или ориентированно-стружечных плит и их аналогов.

Использование особолегких материалов на основе модифицированного пеногипса в качестве теплоизоляции позволяет повысить комфортность микроклимата внутри помещений. Учитывая невысокую теплопроводность пеногипса и монолитный характер заливки, мы понимаем, что возможно формирование бесшовных изоляционных оболочек, что до некоторой степени позволяет решать проблемы, связанные с энергопотреблением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особолегкие материалы – это большая группа материалов на основе вспененных полимеров или на основе минеральных композитов, к которым относят пеностекло, вспененное стекло холодного отверждения, газобетон (D100-300), пеногипс и пеногипс на основе модифицированного вяжущего.

Минеральные особолегкие строительные материалы и, в частности, пеногипс относят к группе негорючих и экологически безопасных материалов, что значительно повышает их привлекательность как с точки зрения пожарной безопасности, так и с точки зрения повышения комфортных условий в помещениях, а также снижения отрицательной нагрузки на окружающую среду.

Свойства пеногипса непосредственно обусловлены его структурой как на макроуровне, так и на микроуровне. Самоорганизация микроструктуры гипса, формирующего межячейковые перегород-

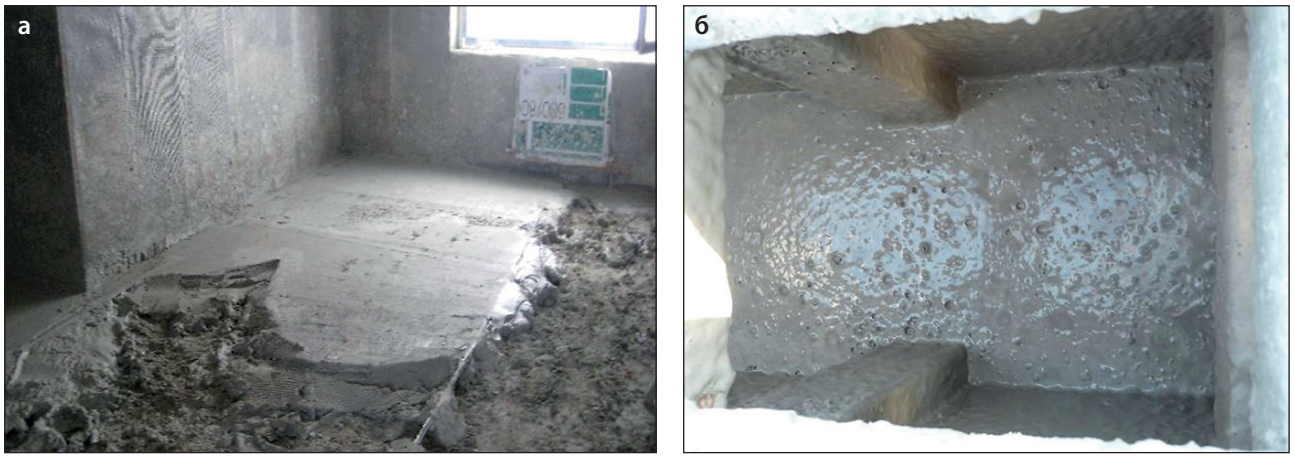


Рис. 6. Использование пеногипса как заливочного материала: а – заливка перекрытия пеногипсовой смесью; б – пеногипсовая смесь, уложенная в пустоты каркасно-обшивных стен [8]

ки, позволяет получать кристаллические системы, обладающие частичной проницаемостью для паровоздушных смесей, что положительно сказывается на сорбционных характеристиках материала и позволяет рекомендовать его для отделки интерьеров не только с позиций его акустических характеристик, но и как изделия, обеспечивающие регулирование уровня загрязнения воздуха в помещениях.

Установленные значения эксплуатационных характеристик модифицированного пеногипса позволяют рекомендовать этот материал как для изготовления штучных изделий (для эксплуатации внутри помещений), так и для применения в малоэтажном строительстве домов из каркасно-обшивных конструкций, кирпича и мелких блоков в качестве теплоизоляционного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Bessonov I.V., Mednikova E.A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings. *Polymers*. 2021; 13(21):3698; https://doi.org/10.3390/polym13213698

2. Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Bessonov I.V., Bobrova E.Y., Pshunov T.A., Dotkulov K.T. Modified Polyethylene Foam for Critical Environments. *Polymers*. 2022;(14):4688. https://doi.org/10.3390/polym14214688

3. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее. *Вестник МГСУ*. 2017;12(100):9–16. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.1.9-16

4. Qu X., et al., Novel glass foam with microwave absorption properties obtained from waste glass, C, and Fe_2O_3. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023; 601: 122069. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.122069

5. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Зорин В.А. Природоподобные материалы и конструкции в машиностроении. Монография. МАДИ, 2020. 304 с. ISBN 978-5-7962-0259-3

6. Пучка О.В., Степанова М.Н., Ремезов Р.А. Использование высокоэффективных утеплителей на основе пеностекла для тепловой изоляции ограждающих конструкций, зданий и сооружений. *Стекло мира*. 2011; 2:62-64.

7. Мирюк О.А. Ячеистые материалы на основе жидкого стекла. *Universum: технические науки*. 2015;4-5(17). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/2162

8. Лотов В.А., Хабибулин Ш.А. Применение модифицированного жидкостекольного вяжущего в производстве строительных материалов. *Строительные материалы*. 2015;(1):72-75. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-721-1-72-75

9. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Горбунова Э.А., Говряков И.С., Гудков П.К., Богомолова Л.К. Прогнозирование водостойкости высокопористого материала на основе жидкого стекла. *Приволжский научный журнал*. 2024; (2): 90-99. УДК 691-405.8. ISSN 1995-2511

10. Bessonov Igor, Pilipenko Anton, Medvedev Andrey, Besfamilnaya Valeria Mathematical method for modeling the properties of cellular structures. *AIP Conference Proceedings*. 2497, 040016. 2023. https://doi.org/10.1063/5.0106365

11. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Бессонов И.В., Медникова Е.А. Энергетическая эффективность строительных систем. Москва: ИНФРА-М, 2023. https://doi.org/10.12737/1856852 - ISBN 978-5-16-017479-2 (print); ISBN 978-5-16-110007-3 (online). URL: https://znanium.com/catalog/product/1897101

12. Бессонов И.В., Жуков А. Д., Говряков И.С, Горбунова Э.А. Моделирование структуры высокопористых материалов. *Жилищное строительство*. 2024;6:36–42. https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-6-36-42

13. Бессонов И.В., Бурьянов А.Ф. Пеногипс в современном малоэтажном строительстве. *Жилищное строительство*. 2024;(5):26–34. https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-26-34

14. Отман А.С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Вашева С.В. Особенности структурообразования композиционных гипсовых вяжущих с комплексом минеральных и органических добавок. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023;(4):24-33.

15. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б., Коровяков В.Ф., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н. Ангидритовое вяжущее, модифицированное комплексной добавкой, для сухих строительных смесей. *Строительные материалы*. 2022;(8):36-40. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-805-8-36-40

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бессонов Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, советник Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия, bessonoviv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9234-4075

Жуков Алексей Дмитриевич – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, член-корреспондент Российской инженерной академии, Москва, Россия, lj211@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-0593-3259

Боброва Екатерина Юрьевна – кандидат экономических наук, советник директора Института строительства и жилищно-коммунального хозяйства Государственной академии специалистов инвестиционной сферы Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия, mla-gasis@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6541-4552

Горбунова Элина Александровна – аспирант кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, ведущий инженер Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия, eg15082000@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7241-4136

Говряков Илья Сергеевич – аспирант кафедры строительного материаловедения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, ведущий инженер Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия, govr190@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8327-9980

ВКЛАД АВТОРОВ

Бессонов И.В. – научное руководство, разработка концепции исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Жуков А.Д. – разработка концепции исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Боброва Е.Ю. – развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Горбунова Э.А. – выполнение практической части исследования, доработка текста.

Говряков И.С. – выполнение практической части исследования, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.03.2025; одобрена после рецензирования 05.04.2025; принята к публикации 08.04.2025.

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131

CC BY 4.0

Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials

Alexander N. Koshev, Valentina V. Kuzina*
Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia
* Corresponding author: e-mail: kuzina-vv@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. The porous composite and nanocomposite materials discussed in this publication are metallized carbon-graphite materials, in particular carbon fiber materials (CFMs). At metallization of CFMs one of the actual problems is the task of applying uniform metal coating on the surface of CFMs fibers over the entire volume of the processed material. One of the most effective ways to coat CFMs with metals and their alloys is the galvanic method. This method allows, among other things, to optimize the process by optimizing both the design of the electrolyzer with flow-through three-dimensional electrodes (FTE) and the choice of electrodeposition modes, such as galvanic, concentration, and hydrodynamic. **Materials and methods.** Methods of mathematical modeling of porous medium metallization processes and previously published experimental data were used to solve problems on calculation of operating modes and elements of the electrolyzer design, in particular, the specific reaction surface of the UWM distributed over the thickness of the electrolyzer. **Results and discussion.** The development of mathematical models of the processes of electroplating metallization of CFMs is carried out. Boundary value problems of mathematical physics are formulated and calculation methods are proposed. Problems of optimization of distribution of specific reaction surface of CFMs by thickness of FTE on the basis of electrochemical theory of processes in porous medium are set, ways of their solution are presented. Specific technological problems are solved. The comparison of the most effective values of the distribution of specific reaction surface of CFMs over the thickness of FTE obtained as a result of modeling with the experimental data is given. The workability of models and methods for studying the process of copper electrodeposition from sulfuric acid electrolyte is shown. **Conclusion.** Calculation of regularities of electrochemical processes of metal extraction in FTE on the basis of the developed mathematical models allows to predict the results of electrolysis, determine the optimal modes of operation and elements of FTE design. The use of FTE for metallization of CFMs with properly distributed reaction surface contributes to obtaining composite materials with specified properties.

KEYWORDS: carbon-graphite cathode, composite and nanocomposite materials, metallization process, distributed reaction surface, mathematical modeling, optimization

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was financially supported by RSF within the framework of scientific project No. 25-21-00135 “Modeling of electrochemical metallization processes of porous carbon composite materials in order to determine the effective values of distributed specific reaction surface and electrical conductivity of the flowing three-dimensional electrode”.

FOR CITATION:
Koshev A.N., Kuzina V.V. Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):119–131. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131. – EDN: XWDYCA.

© Koshev A.N., Kuzina V.V., 2025

CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Распределенная реакционная поверхность углеграфитовых объемно пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и нанокомпозиционных материалов

Александр Николаевич Кошев, Валентина Владимировна Кузина*
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: kuzina-vv@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Пористые композиционные и нанокомпозиционные материалы, рассматриваемые в данной публикации, представляют собой металлизированные углеграфитовые материалы, *в частности углеродные волокнистые материалы* (УВМ). При металлизации УВМ одной из актуальных задач является задача нанесения равномерного металлопокрытия на поверхность волокон УВМ по всему объему обрабатываемого материала. Одним из эффективных способов покрытия УВМ металлами и их сплавами является гальванический способ, позволяющий, кроме прочих достоинств, оптимизировать процесс как по элементам конструкции электролизера с проточными трехмерными электродами (ПТЭ), так и за счет правильного выбора режимов электроосаждения: гальванического, концентрационного, гидродинамического и пр. **Материалы и методы.** Для решения задач по расчету режимов работы и элементов конструкции электролизера, в частности, распределенной по толщине электролизера удельной реакционной поверхности УВМ, использованы методы математического моделирования процессов металлизации пористой среды и ранее опубликованные экспериментальные данные. **Результаты и обсуждение.** Выполнено развитие математических моделей процессов гальванической металлизации УВМ. Сформулированы краевые задачи математической физики, предложены методы расчета. Поставлены задачи оптимизации распределения удельной реакционной поверхности УВМ по толщине ПТЭ на основе электрохимической теории процессов в пористой среде, представлены пути их решения. Решены конкретные технологические задачи. Приводится сравнение полученных в результате моделирования наиболее эффективных значений распределения удельной реакционной поверхности УВМ по толщине ПТЭ с экспериментальными данными. Показана работоспособность моделей и методов для исследования процесса электроосаждения меди из сернокислого электролита. **Выводы.** Расчет закономерностей электрохимических процессов извлечения металлов в ПТЭ на основе разработанных математических моделей позволяет прогнозировать результаты электролиза, определять оптимальные режимы работы и элементы конструкции ПТЭ. Использование ПТЭ для металлизации УВМ с правильно распределенной реакционной поверхностью способствует получению композиционных материалов с заданными свойствами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углеграфитовый катод, композиционные и нанокомпозиционные материалы, процесс металлизации, распределенная реакционная поверхность, математическое моделирование, оптимизация

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 25-21-00135 «Моделирование процессов электрохимической металлизации пористых углеродных композиционных материалов с целью определения эффективных значений распределенных удельной реакционной поверхности и электропроводности проточного трехмерного электрода».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Кошев А.Н., Кузина В.В. Распределенная реакционная поверхность углеграфитовых объемно пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и нанокомпозиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(2):119–131. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131. – EDN: XWDYCA.

INTRODUCTION

In various fields of industrial production of high-tech products [1–9], composite materials of carbon fiber materials (CFMs) with metallic coating of carbon graphite filaments with gold, silver, platinum, copper or other metals and their alloys selected to ensure the given technological requirements are used.

Metal coating on CFMs is possible by various methods, both chemical and mechanical, but the most effective method of metallization of a solid porous base appears to be metallization using electrolysis methods [10–14]. Galvanic metallization of CFMs is preferable for a number of reasons, the main of which, of course, is the possibility of selecting the mode of electrodeposition: the strength of the overall current, the speed and direction

of the electrolyte flow, the concentration of electroactive substances, the design features of the electrolyzer and other technological conditions. The choice of modes of electrolysis, shape and material of the cathode, as well as the composition and concentration of the electrolyte is determined by the requirements to the technical parameters of the composite material and technological parameters of the electrodeposition process, which, first of all, include such as the uniformity of metal distribution over the thickness of the CFMs and the intensity of the deposition process.

Optimization of electrodeposition modes and design features of the electrolyzer in order to intensify metallization and obtain materials with specified properties is impossible without the use of methods of mathematical modeling and calculation of regularities of electrochemical processes and prediction of electrolysis results [13]. One of the main characteristics that provide a significant intensification of metal electrodeposition on the CFMs in a flowing three-dimensional electrode (FTE) is the value of the specific reaction surface of the electrode.

Electrolysis of metals in electrolyzers with FTE is carried out, as a rule, from dilute solutions. This allows to use the advantages of CFMs cathodes, such as the ability to conduct processes with a high deposition rate and a sufficient degree of filling of the electrode with metal. The process of CFMs metallization is limited by the diffusion of ions to the surface of fibers. The thickness of the diffusion layer limiting the discharge rate of metal ions for 10 μm diameter fibers is assumed to be 10^{-4} cm [14].

Obviously, when determining the specific reaction surface of the CFMs, not only the total lateral surface of the carbon-graphite fibers, but also those surface roughnesses (protrusions, depressions, etc.), the size of which in their defining heights and depths is not less than the thickness of the diffusion layer, i.e., a value of the order of 10^{-4} cm, should be taken into account.

The papers [14, 15] present the results of studies conducted by Prof. V.K. Varentsov and co-workers to determine the value of S_v – the reaction surface of CFMs during electrodeposition of metals in FTE limited by the diffusion stage of the galvanic process.

Table 1 contains values of some nonwoven and woven CFMs parameters: r – fiber radius, S_v – specific surface determined by electrochemical method, $\varkappa$ – specific electrical conductivity of CFMs in free and compressed

Table 1. Parameters of carbon fiber materials

Materials	r, μm	S_v, cm^{-1}	κ, Siemens/cm	ε
VNG-50	6.0	265	1.3/2.6	0.92
VNG-30	5.5	160	0.90/0.33	0.96
VINN-250	4.5	280	0.1/0.4	0.97
NTM-200	5.0	216	0.07/0.4	0.96
NTM-100	5.4	220	0.03/0.12	0.96
Mtilon	5.1	270	0.13/0.5	0.94
VVP-66-95	4.7	255	0.006/0.05	0.96
FPN	5.0	125	0.001/0.005	0.98
KNM	6.1	160	0.009/0.03	0.98
VINN-150	5.0	220	0.05/0.16	0.92
KSS	4.5	–	0.1/0.2	0.89
Uglen	5.1	240	0.05/0.13	0.95
Gralen	4.9	260	0.1/0.4	0.96
NT-1	6.2	165	0.001/0.02	0.90
NT-2	6.2	165	0.003/0.014	0.90
AMN	6.1	180	0.01/0.12	0.96
TVSh	4.6	780	0.16/0.4	0.91
TGN-2M	5.0	220	0.45/1.5	0.85
LVIK-95	6.0	270	0.26/0.87	0.83
LG-50	3.8	150	0.02/0.09	0.76
LG-30	3.7	180	0.64/2.1	0.78
LG-10	3.4	170	0.44/1.4	0.77

twice (above the line and below the line, respectively), ε – porosity of CFMs [14].

The results of studies conducted by V.K. Varentsov and co-workers and presented in [14] allow us to state that nonwoven CFMs have a significantly larger surface area of carbon-graphite fibers, on which electrochemical reactions are possible, compared to woven CFMs.

Our statistical processing of the data from Table 1 shows that the most significant factors influencing the value of specific reaction surface S_v are fiber radius r and material porosity ε:

$$S_v = a_0 + a_r r + a_\varepsilon \varepsilon + a_{r\varepsilon} r\varepsilon. \quad (1)$$

Based on the calculations performed, the coefficients of the regression model a_0, a_r, a_ε, $a_{r\varepsilon}$, were determined, and it was shown that the $a_{r\varepsilon} r\varepsilon$ summand in relation (1) is much less significant in comparison with the first and second summands. Consequently, the dependence of the reaction surface S_v as a function of the parameters a_0, a_r, a_ε can be assumed linear:

$$S_v = 3066{,}93 - 574{,}911r + 24{,}567\varepsilon. \quad (2)$$

The constructed model can be used to estimate the specific surface if the fiber radius and porosity of the CFMS are known; it should be noted that they are obtained for $4.5 \leqslant r \leqslant 6.1$ (μm) and $92 \leqslant \varepsilon \leqslant 98\%$, so they cannot be extrapolated for r and ε, which strongly exceed the boundaries of these intervals. For the same reason, they may be of little use for determining the specific surface area of FTE during metal electrodeposition, inside a porous space, when r and ε change significantly.

In the case when the radius of the CFMs fiber, the porosity of the material and, as a consequence, its specific reaction surface change significantly in the process of metal deposition, it is necessary to take into account these changes in the mathematical modeling of the electrolysis process.

To find the dependence of the specific surface area of the CFMs S_v on the weight of the metal precipitate M, in the first approximation, it was considered that the precipitate is distributed along the fibers uniformly. With the known porosity of the material, it is possible to find the volume of fibers that make up a "tablet" of CFMs with an area of 1 cm^2 and a thickness of 1 cm, and determine n – the number of fibers in the tablet, assuming that each of the fibers represents a cylinder of known radius r: $n = (1 - \varepsilon)/(\pi r^2)$.

When M grams of metal with density q, g/cm^3 are deposited, the radius of the fibers and the porosity of the electrode become equal to respectively

$$r_M = \sqrt{r^2 + \frac{M}{\pi q n}}, \cdots \varepsilon_M = \varepsilon - \frac{M}{q}, \quad (3)$$

and specific surface

$$S_v = 2\pi r_M n = \frac{2(1-\varepsilon)}{r}\sqrt{1 + \frac{M}{q(1-\varepsilon)}}. \quad (4)$$

Let us show the magnitude of change of specific reaction surface from the amount of deposited metal for $r = 5 \cdot 10^{-4}$ cm, $\varepsilon = 0.95$. For these values we can take $n \approx 6 \cdot 10^4$. At the beginning of the process $r_M = r$, and from formula (3) we find $S_v = 200$ cm. Let us find S_v^{max} when the maximum amount of metal achieved in practice is deposited on the FTE. For gold, this is approximately $M = 40$ g per 1 g of CFMs. Considering the density of carbon graphite equal to 1.6 g/cm^3 [16], it is easy to determine that 3.2 g of metal can be deposited on the considered volume of CFMS. For gold $q = 19.6$ g/cm^3. Substituting these data into (3), we find $S_v^{max} \approx 413$ cm^3. Thus it is determined that in this case there can be a doubling of the specific surface of FTE for the whole cycle of metal deposition from the solution. It is obvious that when solving problems on determination of technological parameters of metal extraction process on FTE it is necessary to take into account possible changes of values of specific surface, porosity, linear velocity of electrolyte flow, etc. in the dynamics of electrolysis.

To calculate the specific reaction surface S_v by equation (4), we use the following reasoning. The amount of deposited metal – ΔM during the FTE operation time – $\Delta\tau$, at the electrode point – x, $0 \leqslant x \leqslant L$, in the FTE cross-section, with an area equal to one, will be determined by the ratio: $\Delta M = [M(x,\tau + \Delta\tau) - M(x,\tau)]\Delta x$; the concentration of the deposited metal ions during the flow of the electrolyte solution from point x to point $x + \Delta x$ will decrease by the amount $\Delta C = [C(x,\tau) - C(x + \Delta x,\tau)]$; the concentration of metal ions per unit time will change by the value $-\Delta C m_v$, and the amount of metal deposited in a unit section of FTE at point x with thickness Δx, therefore, will be equal to $\Delta C m_v \Delta\tau$.

From the obvious relation $[M(x,\tau + \Delta\tau) - M(x,\tau)]$ $\Delta x = \Delta C m_v \Delta\tau$, in the limit at $\Delta x \to 0$ and $\Delta\tau \to 0$, it is not difficult to obtain the formula

$$M(x,\tau) = m_v\, dx \int_0^\tau (\partial C(x,t)/\partial x)\, dt.$$

$M(x,\tau)$ – the amount of metal at point x during time τ – will be used in the calculation of specific surface $S_v(x,\tau)$ by formula (4).

The presented information allows us to conclude that the specific reaction surface of FTE should be considered as one of the parameters to be optimized. Moreover, the possibility to select materials for FTE formation (see Table 1) allows us to consider cathodes with specific reaction surface distributed along the thickness of FTE. Note also that it is possible to change the value of S_v by compressing or stretching the selected cathode material.

MATERIALS AND METHODS

Mathematical model

Based on the electrochemical theory [17], the flow of charged particles of the i-th N_i grade in a multicomponent electrolyte ($i = 1, ..., n$) is carried out under the action of the electric field potential gradient ∇E and the flow of electrolyte with velocity v:

$$N_i = z_i \mu_i F C_i \nabla E + C_i v. \quad (5)$$

In this relation, z_i is the charge of the electroactive component of the solution; C_i is its concentration; μ_i is its mobility.

In a homogeneous medium, the material balance conditions are valid [17, 18] from which the equations follow:

$$\partial C_i/\partial t = -(N_i), \quad (6)$$

$$\partial C_i/\partial t = -(z_i \mu_i F C_i \nabla E + C_i v). \quad (7)$$

From (6) and (7) it is not difficult to obtain equation (8):

$$F \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{-\partial\left(\kappa \frac{dE}{dx}\right)}{\partial x} - vF \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} F \sum z_i C_i. \quad (8)$$

It should be noted that in the transformations of equation (5) to the system of differential equations (8), mathematical modeling has been carried out in accordance with the assumption that the deposition reaction proceeds at each point of the pseudohomogeneous electrode space. Consequently, the metal ion concentration changes as the electrolyte moves in the FTE volume, i.e. $\partial C_i/\partial x \neq 0$ at each point with x coordinate along the FTE thickness.

Modeling the change of metal ion concentration along the thickness of the FTE $\partial C_i/\partial x$ taking into account the dependence of the specific reaction surface on the x coordinate along the electrode thickness $S = S_v(x)$, similar to the one described in [18], we obtain a relation in the form of a differential equation, where in the right part there is an unknown function J_{Si} – distributed polarizing current density:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{-S_V(x)}{|v|z_i F} J_{Si}(x). \quad (9)$$

Taking into account relation (9), equation (8) is transformed to the form:

$$F \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{-\partial\left(\kappa \frac{dE}{dx}\right)}{\partial x} - S_V(x) \sum J_{Si} - \frac{\partial v}{\partial x} F \sum z_i C_i. \quad (10)$$

Considering, similarly to [18, 20], $\varkappa = 1/\rho = 1/(\rho_s + \rho_l)$ and $\rho_s = 1/\varkappa_s$, $\rho_l = 1/\varkappa_l$, we transform equation (10):

$$F \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial\left(\frac{\kappa_S \cdot \kappa_l}{\kappa_S + \kappa_l} \frac{dE}{dx}\right)}{\partial x} + S_V(x) \sum J_{Si} + \frac{\partial v}{\partial x} F \sum z_i C_i. \quad (11)$$

The system of equations (9), (11) is supplemented by kinetic equations linking J_{Si} and E [18, 20]:

$$J_{Si}(x) = j_{0i} \frac{e^{\alpha_i z_i F((E-\varphi_{Ri})/RT} - e^{(\alpha_i - 1) z_i F(E-\varphi_{Ri})/RT}}{1 + j_{0i} e^{\alpha_i z_i F(E-\varphi_{Ri})/RT} / z_i F K_m C_i}. \quad (12)$$

Here φ_{Ri} is the equilibrium potential of the i-th reaction.

The boundary and initial conditions for the system (9), (11), (12) can be represented by the following relations:

$$\partial E/\partial n\,(\tau,0) = J_g(\tau)\,\rho_s;\ \partial E/\partial n\,(\tau,l) = -J_g(\tau)\,\rho_l;$$
$$C_i(\tau,0) = C_{0i}. \quad (13)$$

Here $J_g(\tau)$ is the overall current density supplied to the electrode at time τ, C_{0i} is the concentration of the i-th electroactive component in the electrolyte supplied to the system. Note that differential equation (11), unlike the differential models we used earlier, contains the value of specific reaction surface $S(x)$ distributed over the thickness of the electrode. This approach entails the necessity of a substantial adjustment of the algorithm and computer program of calculation by the model (9), (11)–(13) in the direction of complication.

Fig. 1 shows the scheme of FTE with a cathode made of three layers of CFMs of different types.

Optimization problem formulation

The system of equations (9), (11)–(13) allows us to calculate the unknown electrochemical functions distributed over the thickness of FTE: potential, current density, concentration at the distributed, initially known function $S_v(x)$ – specific reaction surface of FTE at extraction of metals from multicomponent electrolyte. To elucidate the regularities and influence of $S_v(x)$ on the resulting process parameters, it is quite acceptable to study the behavior of the system with FTE for an electrolyte with one electroactive component, i.e., when the number of components $n = 1$. As a further simplification, consider the situation in which $C(\tau,x)$ is represented as a piecewise constant function of time τ, that is, when the entire process interval can be represented by a union of subintervals, in each of which the change in concentration from τ can be assumed to be averagely constant. Taking into account the simplifications adopted, the electrolysis problem under consideration in FTE will be written in the following stationary form:

$$\frac{d^2E}{dx^2} = \frac{-\kappa_l \frac{d\kappa_S}{dx}}{\kappa_S(\kappa_S + \kappa_l)} \frac{dE}{dx} + S_v(x) \left(\frac{1}{\kappa_S} + \frac{1}{\kappa_l}\right) J_S(x), \quad (14)$$

$$\frac{dC}{dx} = \frac{-S_v(x)}{vzF} J_S(x) \quad (15)$$

with boundary conditions:

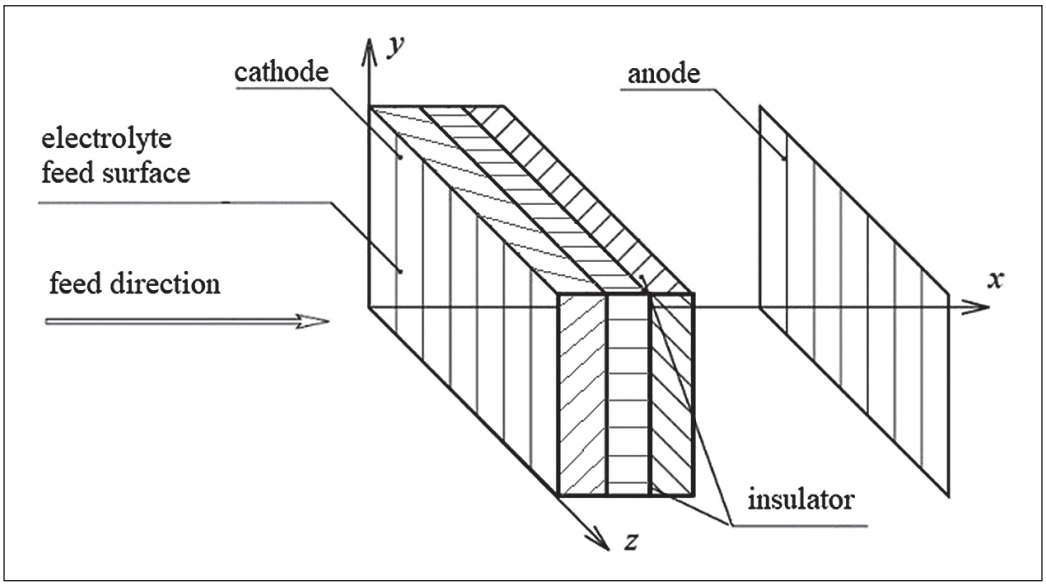


Fig. 1. Schematic of a flow-through three-dimensional electrode with a cathode made of three layers of CFMs

$$\frac{\partial E}{\partial x}(0) = \frac{1}{\kappa_s} J, \frac{\partial E}{\partial x}(L) = \frac{1}{\kappa_l} J, C(0) = C_0, \quad (16)$$

where J is total electrode current density.

In order to numerically implement the model (9), (11)–(13), a set of programs was developed and algorithmic programming languages Delphi and Object Pascal were used to write them.

Statement of the optimization problem

Let us consider the problem of calculating the optimal distribution of the specific reaction surface over the thickness of a flow volume porous electrode as a problem of optimal mathematical control of the electrochemical process by selecting the optimal control action $u(x) = S_v(x)$. Let us denote:

$$a = \frac{zF}{RT};\ b = \frac{j_0}{zFK_m};\ d = \frac{1}{vzF};\ g = \left(\frac{1}{\kappa_s} + \frac{1}{\kappa_l}\right);$$

$$E = y_1;\quad \frac{dy_1}{dx} = y_2 = f_1(y_1, y_2, y_3, u);$$

$$\frac{dy_2}{dx} = \frac{-\kappa_l \frac{d\kappa_s}{dx}}{\kappa_s(\kappa_s + \kappa_l)} y_2 + u(x)\left(\frac{1}{\kappa_s} + \frac{1}{\kappa_l}\right) j_S(x) =$$
$$= f_2(y_1, y_2, y_3, u);$$

$$y_3(x) = C(x); \frac{dy_2}{dx} = -\frac{u(x)}{vzF} J_S(x) = f_3(y_1, y_2, y_3, u).$$

Equations (14)–(16) will take the form:

$$dy_i/dx = f_i(y_1, y_2, y_3, u),\ i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

with boundary conditions:

$$y_2(0) = (1/\varkappa_s)J;\ y_2(L) = (1/\varkappa_l)J;\ y_3(0) = C_0. \quad (18)$$

The problem of optimal mathematical control in the general case consists in determining by calculation the control vector-function $u(x)$, which ensures the fulfillment of the criterion of the best under given conditions uniformity of distribution of the polarizing current density or potential over the thickness of FTE.

The criterion of uniformity of distribution of the function $J_s(x)$ can be formulated in different ways. The following form is proposed in this paper:

Thus, the problem is to determine the function $u(x)$ such that the solution of equations (17)–(18) satisfies the criterion of the best uniformity of current density distribution over the thickness of FTE.

The following integral criterion is proposed to be used as the uniformity criterion:

Thus, the problem is to determine the function $u(x)$ such that the solution of equations (17)–(18) satisfies the criterion of the best uniformity of current density distribution over the thickness of FTE.

The following integral criterion is proposed to be used as the uniformity criterion:

$$\sigma(u) = \int_0^L \left(\frac{J}{L} - J_S(y_1, y_3)\right)^2 dx \to \min. \quad (19)$$

Method of solving the problem

To solve the problem of optimal mathematical control (17)–(19), it is proposed to use the maximum principle of L. S. Pontryagin [21, 22]. In addition to the obvious advantages, consisting, for example, in an uncomplicated

algorithmization of the maximum principle, it is necessary to note the following circumstance. In the works [13, 20] was presented a study of the stability of the system of differential equations (17), it was shown that the system is unstable, to the variation of initial data and functions in the right-hand side of the system. That is, when carrying out calculations by modeling equations, at significant values of FTE thickness, it may be necessary to apply regularizing methods. It is known that the Pontryagin maximum principle has pronounced regularizing properties [22].

To implement the method of L.S. Pontryagin, the system (17)–(19) should be supplemented with an equation corresponding to the control optimization criterion (19) and, conjugated to equations (17), with a system of differential equations with respect to unknown functions $\psi_i(x)$ $i = 0, ..., 2$, related to the main functions by differential relations and initial conditions specified by the method:

$$dy_0/dx = ((J/L) - J_S(y_1, y_3))^2 = f_0(y_1, y_3, u);$$
$$y_0(0) = 0, \quad (20)$$

$$d\psi_i/dx = -\sum_{j=0}^{3}\psi_j(\partial f_j/\partial y_i),\ i = 0, ..., 3;$$
$$\psi_0(0) = 1;\ \psi_1(L) = \psi_2(L) = \psi_3(L) = 0. \quad (21)$$

The right-hand sides in equations (21), to calculate the derivatives $d\psi_i/dx$, do not require complex transformations and can be presented in an analytical form, which is not difficult for algorithmization and programming when computing on a computer, but the resulting formulas are cumbersome and are not given in this paper for this reason.

In accordance with the method of S.L. Pontryagin, the optimal control $u(x)$ is optimal if and only if its values minimize the so-called Hamilton function [21–23]:

$$H(x, y_0(x), ..., y_3(x), \psi_0(x), ..., \psi_3(x), u(x)) =$$
$$\sum_{i=0}^{3}\psi_i(x, y_i, u) f_i(x, \psi_i, u). \quad (22)$$

It is convenient to minimize the Hamilton function using the well-known method of multivariate gradient descent. Suppose that we have performed k iterations of the search, i.e., we have computed the vector $u^k(x) = (u_1^k, u_2^k, ..., u_m^k)$.

The numerical values of the functions uk(x) allow us to solve the system (20)–(21), for example, by the classical Runge – Kutta method or any other method [23]. Then we return to the calculation of $u^{k+1}(x)$ by performing the next step of minimizing the Hamilton function, and so on until the end of the iterative process, ending when the Hamilton function does not change from iteration to iteration within a given accuracy.

Solution of the problem of optimization of the control action distribution u(x) = S$_v$(x) under some specific conditions.

When solving practical problems of metal extraction on FTE and CFMS metallization, the following assumptions and simplifications can often be made. First, it can be assumed that the change in the conductivity of the CFMS over the thickness of the FTE during the electrolysis process is insignificant, i.e., $d\varkappa_s/dx \approx 0$, and the first summand in equation (14) and subsequent ones can be neglected. Second, we take the uniformity of the electrolysis process distribution over the FTE thickness as a criterion for the uniformity of the electrode potential distribution.

Further, let us assume that the problem of finding the controlling influence $u(x) = S_v(x)$ is solved and the distribution of the metal electrodeposition current density is close to uniform: $J_S(x) = J_m$. In this case, it can be assumed that the distribution of the electroactive substance concentration over the electrode thickness is close to uniform, and the third equation in the system (17) can be neglected. Then the problem (17)–(22) is simplified to the form:

$$\begin{cases} dy_0/dx = |E(x) - E_m|; \\ dy_1/dx = y_2; \\ dy_2/dx = u(x)(1/\varkappa_s + 1/\varkappa_l)\,J_m; \\ \psi_0(x) = 1; \\ d\psi_1/dx = \mathrm{sign}(E - E_m); \\ d\psi_2/dx = -\psi_1; \\ y_0(0) = 0;\ y_2(0) = (1/\varkappa_s)J;\ y_2(L) = (1/\varkappa_l)J; \\ \psi_0(0) = 1;\ \psi_1(L) = \psi_2(L) = 0. \end{cases} \quad (23)$$

For this formulation of the problem, the Hamilton function is as follows:

$$H(x, y_0, y_1, y_2, \psi_0, \psi_1, \psi_2, u) = -|E(x) - E_m| +$$
$$+ \psi_1 y_2 + \psi_2 u(x)(1/\varkappa_s + 1/\varkappa_l)j_m. \quad (24)$$

From the system of equations (23) it is not difficult to determine:

$$\psi_1(x) = (x - L)\,\mathrm{sign}(E - E_m), \quad (25)$$

$$\psi_2(x) = 1/2\,(x - L)^2\,\mathrm{sign}(E - E_m) \quad (26)$$

and, therefore,

$$H = -|E(x) - E_m| + (x - L)\,\mathrm{sign}(E - E_m)\,y_2 +$$
$$+ 1/2\,(x - L)^2\,\mathrm{sign}(E - E_m)\,u(1/\varkappa_s + 1/\varkappa_l)\,J_m. \quad (27)$$

Analyzing relation (27), it is easy to see that the control action $u = S_v$ enters the expression for the Hamilton function linearly, and the calculation of the partial derivative H on this variable, followed by equating this derivative to zero, does not lead to the solution of the problem. However, we note that the function $H = H(u)$ will have a minimum when the third summand in expression (27) is minimal. Considering the known U-shaped form of the potential distribution function $E(x)$ along the electrode

thickness [24], we can conclude that in the case when $E > E_m$, the value $u(x) = S_v(x)$ should be minimal, and when $E < E_m$ – maximum possible. It follows that the situation when the initial layers of the CFMS have a smaller specific reaction surface, then, in the middle part of the electrode – a larger one and then again a smaller one is preferable from the point of view of uniformity of the FTE potential distribution along the thickness.

An example of solving the problem of effective selection of CFMs layers of a volume-porous cathode in order to improve the uniformity of the deposited metal distribution over the thickness of FTE.

Let us consider the results of calculated and experimental distribution of copper precipitation in 6 mm thick PTE when using AMN (Fig. 2) and VNG-50 (Fig. 3) as cathode material, the values of specific reaction surface of which differ significantly: 180 cm^{-1} and 265 cm^{-1}, respectively. 3. It should be noted that, as before, all the results of experimental studies were obtained by Prof. V.K. Varentsov and published, for example, in [14, 20]. Electrolyte composition (g/l): $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ – 170, H_2SO_4 – 25, $(NH_4)_2SO_4$ – 80; specific conductivity 0.101 cm/cm; copper ion concentration 0.16±0.03 g/l. Copper deposition was carried out at an overall current density of 500 A/m^2. In Fig. 2 and Fig. 3 red piecewise linear functions correspond to the experiment, blue – to the calculation at electrolysis duration, min: a, b – 60, c, d – 180, – and with electrolyte flow rate, cm/s: a, c – 0.4, b, d – 1.0.

The computational results and experimental data shown in Fig. 2 and Fig. 3, are in good agreement with each other. It can also be noted that during the metallization of the carbon graphite cathode made of VNG-50 grade CFMS, the total amount of deposited metal exceeds the total amount of metal deposited on the cathode made of AMN grade CFMs, which is explained by the better specific conductivity of VNG-50 grade material. It is easy to see that the distribution of copper over the thickness of the cathode made of AMN grade CFMS is more uniform than the distribution of copper over the thickness of the cathode made of VNG-50 grade CFMS.

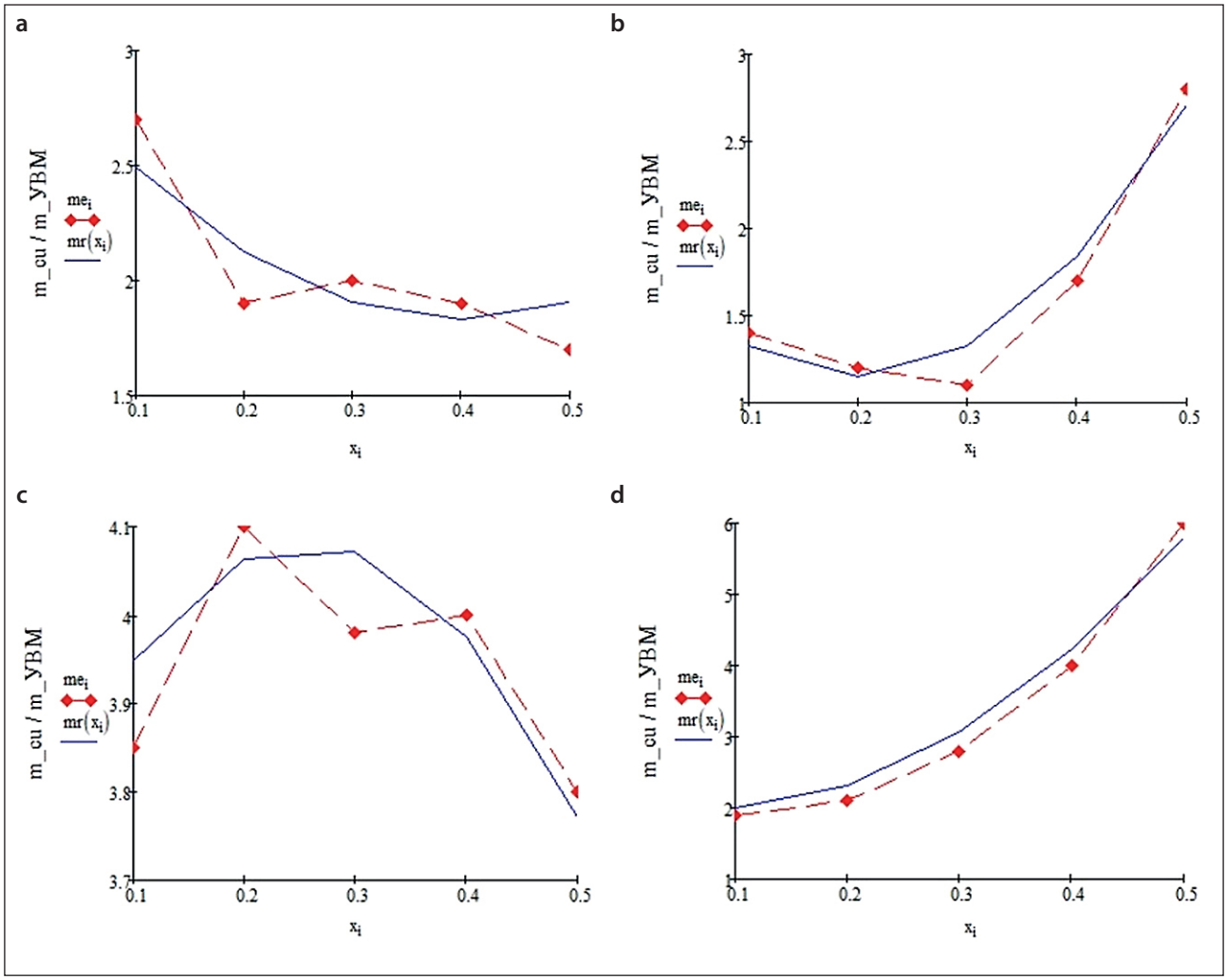


Fig. 2. Metal distribution along the thickness of the ANM cathode

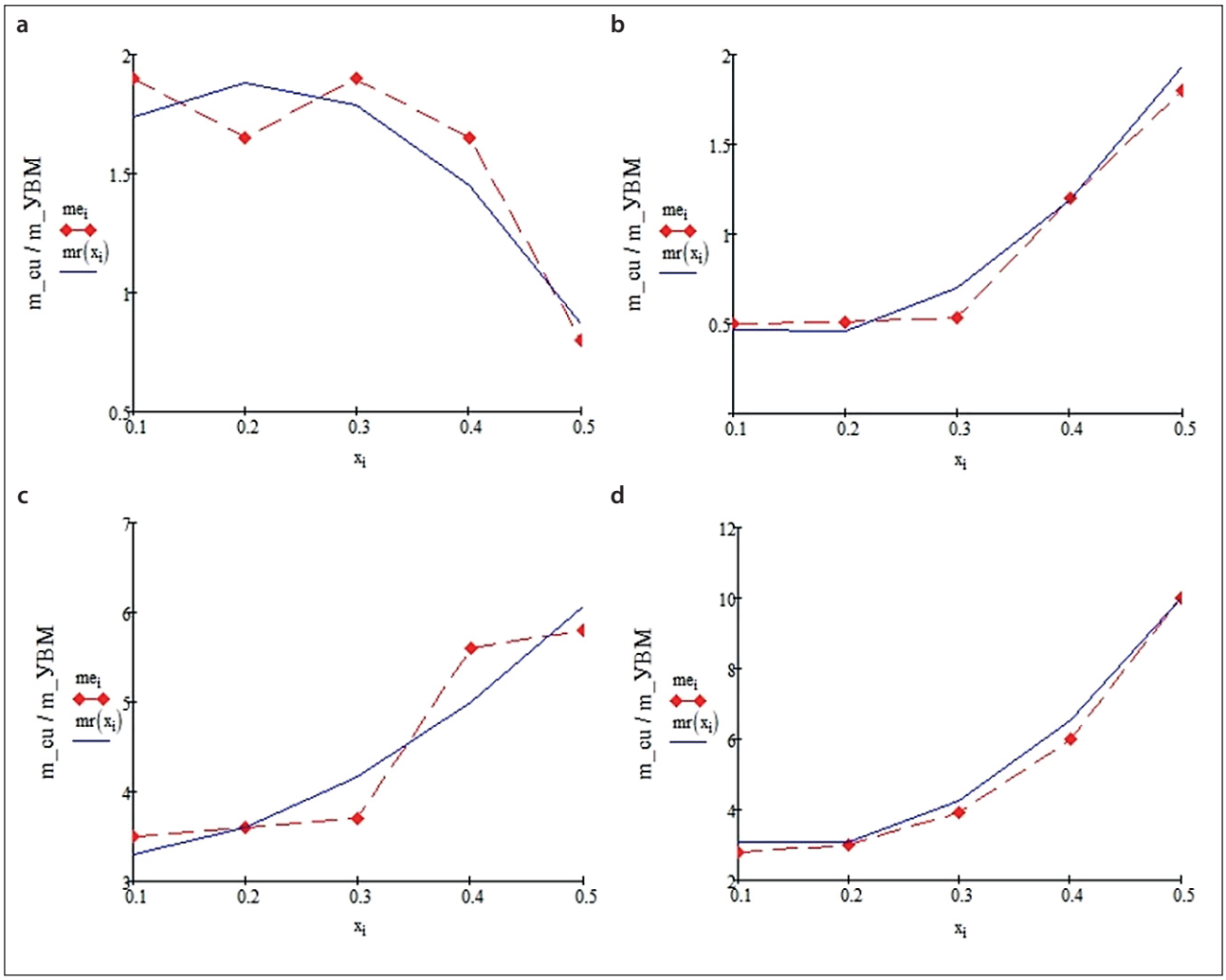


Fig. 3. Metal distribution along the thickness of the VNG-50 cathode

In accordance with the theoretical conclusions given above, it can be assumed that in order to improve the uniformity of the distribution of copper coating of FTE, it is possible to use a volume-porous cathode made of three layers of CFMS in the following sequence: the first layer – from AMN grade CFMs, the second layer – from VNG-50 grade CFMs and the third layer – again from AMN grade CFMs.

Fig. 4 shows the calculated data of copper sludge distribution in FTE consisting of three CFMs layers: AMN; VNG-50; AMN.

Numerical processing of the calculation results shown in Figs. 2–4 allowed us to compile Table 2, the data of which reflect the indices of uniformity of copper distribution over the thickness of the FTE for the considered conditions given above. Here max/min is the index of uniformity of precipitate distribution: max – the largest thickness of precipitate, min – the minimum thickness of precipitate, under different conditions and design features of the volume-porous cathode.

The main conclusion that follows from the analysis of the results of calculations of the best copper distribution through the thickness of the flow-through volumetric porous cathode is that in all series of calculations the best index of uniformity of copper precipitate distribution in FTE is observed in the case of using the cathode composed of three layers of CFMS grades AMN, VNG-50, AMN, successively.

RESULTS AND DISCUSSION

The paper proposes an approach to solving the problem of improving the uniformity of metallic coating in the volume of carbon fiber material, which is the basis of composite and nanocomposite material, during galvanic metallization of CFMS due to the correct formation of FTE from layers of CFMs of different grades with different values of specific reaction surface.

The problem is solved by the method of mathematical modeling and subsequent calculation using the classical

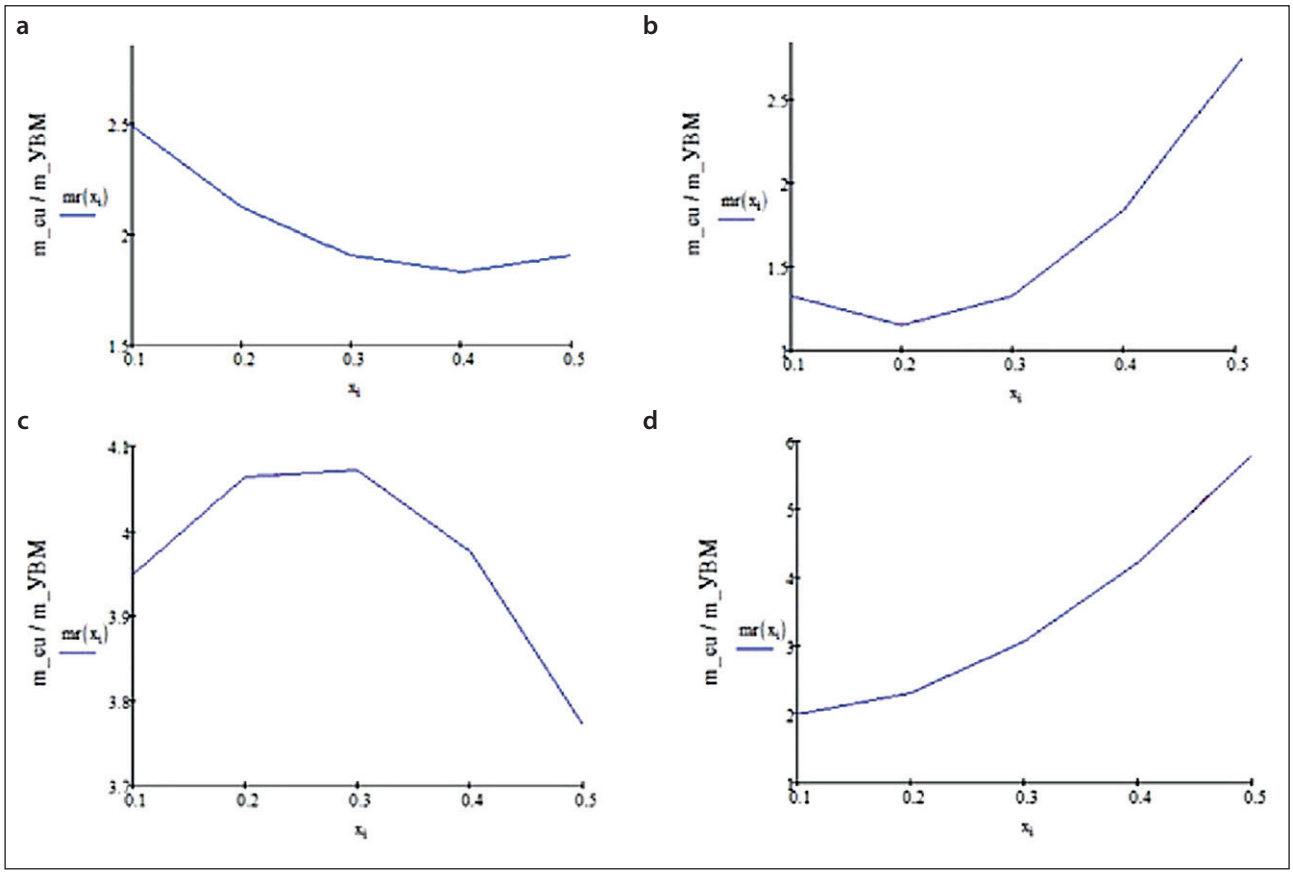


Fig. 4. Distribution of copper precipitate in FTE from three CFMS layers: 1 – AMN, 2 – VNG-50, 3 – AMN, under the following conditions: a – electrolyte flow rate, v = 0.4 cm/s, electrolysis time, t = 60 s; b – v = 1 cm/s, t = 60 s; c – v = 0.4 cm/s, t = 180 s; d – v = 1 cm/s, t = 180 s

Table 2. Values of the uniformity index (max/min) of copper deposit distribution over the thickness of FTE

1st CFMS layer	2nd CFMS layer	1st CFMS layer	Flow rate, *v*, cm/s	Electrolysis time, *t*, s	max/min
AMN	AMN	AMN	0.4	60	1.40
VNG-50	VNG-50	VNG-50	0.4	60	2.05
AMN	VNG-50	AMN	0.4	60	1.30
AMN	AMN	AMN	1.0	60	2.30
VNG-50	VNG-50	VNG-50	1.0	60	4.44
AMN	VNG-50	AMN	1.0	60	2.16
AMN	AMN	AMN	0.4	180	1.20
VNG-50	VNG-50	VNG-50	0.4	180	1.88
AMN	VNG-50	AMN	0.4	180	1.07
AMN	AMH	AMN	1.0	180	2.75
VNG-50	VNG-50	VNG-50	1.0	180	3.34
AMN	VNG-50	AMN	1.0	180	2.60

maximum principle of L.S. Pontryagin, which allows us to formulate and solve the problem of optimization of the distribution of potential, current density and metal deposit over the thickness of FTE. In this case, the distributed specific conductivity of the electrode is taken as a controlling influence.

When developing mathematical models describing galvanic processes in FTE, the possible change of characteristic electrochemical and technological parameters, including the specific reaction surface of CFMs in the process of electrolysis due to changes in the structure of CFMs during metallization of carbon-graphite filaments was taken into account.

Using the elements of regression analysis, regression equations linking the values of specific reaction surface of CFMS depending on the value of the carbon graphite fiber radius and porosity of the carbon graphite material have been constructed and studied.

The use of natural simplifications and transformations made it possible to bring mathematical descriptions to the form of systems of ordinary differential equations, which, in turn, made it possible to present and solve the optimization problem in analytical form and formulate some practical recommendations on the use of CFMs cathodes with a distributed reaction surface.

As examples, practical problems of calculation of copper precipitate distribution during metallization of CFMs of different grades are solved, it is shown that the use of CFMs cathode of three layers provides more uniform distribution of metal over the thickness of the electrode.

CONCLUSION

The development of mathematical models based on modern provisions of the electrochemical theory of metal electrodeposition on flowing carbon graphite cathodes and methods of mathematical modeling allows describing electrolysis processes in FTE in the form of boundary value problems of mathematical physics, for the solution of which it is necessary to use high-level mathematical apparatus. At the same time, the developed mathematical models allow us to formulate the problems of optimization of metallization processes of carbon fiber materials due to the optimal distribution of specific reaction surface over the thickness of the flowing three-dimensional electrode.

Mathematical modeling and numerical calculation methods in the considered case represent an effective scientific method for research and finding parameters of optimal control of electrochemical processes in porous medium. The presented methods and algorithms can be used as a tool for theoretical studies of regularities of metal electrodeposition in FTE and for numerical calculations of optimal technological parameters of the electrolysis process and electrolyzer design elements.

REFERENCES

1. Maslij A.I., Aleksandrova T.P., Medvedev A.J., Belobaba A.G. Synthetic fiber materials with metal and metal-containing nanolayers: methods of preparation and applications. *Fundamental and applied questions of electrochemical and chemical-catalytic deposition of metals and alloys*: Collection of abstracts of reports of the I International Conference. – Moscow: A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, 2017: 62 (In Russ.).

2. Nelyub V.A., Gorodetsky M.A. Algorithm for determining the optimal thickness of metal coating in the manufacture of carbon fiber-reinforced plastics. *Modern knowledge-intensive technologies*. 2019;2:123–127 (In Russ.).

3. Petyushik E.E., Evtukhova T.E., Klevchenya D.I., Romanenkov V.E., Afanasyeva N.A., Pinchuk T.I. Composite permeable material based on carbon fiber. *Proceedings of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology*. 2013;56(5):99–104 (In Russ.).

4. Shuklin S.G., Makarova L.G., Goswami Y.S. Creation of nanocomposites based on polyester resin containing nanodiamonds and carbon nanotubes. *Actual problems of science and technology*: Materials of I Intern. STK. Izhevsk, 2021:172–175 (In Russ.).

5. Yudina T.F., Strogaya G.M., Ershova T.V., Susova L.L., Beilina N.Y. Chemical metallization of carbon materials with developed surface. *Proceedings of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology*. 2012;55(6):34–37 (In Russ.).

6. Böttger-Hiller F., Nier M., Lampke T. Metal-Coated Carbon Fibres for Multifunctional CFRPs. *Journal of Object Technology – International Surface Technology*. 2014;7(1):44–45. https://doi.org/10.1365/s35724-014-0232-9

7. Grechushkina D.E., Nelyub V.A. Study of the kinetics of the flow of epoxy binders over the surface of a carbon fiber with a metal coating. *Steel in Translation*. 2023;53(2):134–137. https://doi.org/10.3103/s0967091223020079

8. Malashin I., Tynchenko V., Gantimurov A., Nelyub V., Borodulin A. A multi-objective optimization of neural networks for predicting the physical properties of textile polymer composite materials. *Polymers*. 2024;16(12):1752. https://doi.org/10.3390/polym16121752

9. Minakov G.S., Shirokikh S.A., Kornilov D.Yu., Koroleva M.Yu. Porous polymer nanocomposite materials for environmental protection. *Chemistry for Sustainable Development*. 2022;30(1):52–63. https://doi.org/10.15372/CSD2022358

10. Averichev O.A., Postnova E.Yu., Galyshev S.N. Electrodeposition of copper coatings on carbon fiber from pyrophosphate electrolyte. *Fundamental and applied questions of electrochemical and chemical-catalytic deposition of metals and alloys*: Collection of abstracts of reports of the III International Conference. – Moscow: A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, 2024:46 (In Russ.).

11. Atanov B.I., Postnova E.Yu., Galyshev S.N. Electrochemical deposition of nickel coating from sulfate electrolyte on carbon fiber. *Fundamental and applied questions of electrochemical and chemical-catalytic deposition of metals and alloys*: Collection of abstracts of reports of the III Intern. conference. Moscow: A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS. 2024:48 (In Russ.).

12. Kuzina V.V., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Koshev A.N. Mathematical modeling of physical and chemical processes in porous media in solving the problems of nanocomposite materials and water-filling. *Nanotechnologies in construction*. 2023;15(4):298–309. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-298-309. – EDN: HJIEDH.

13. Gvozdeva I.G. *Mathematical modeling of processes of metal extraction from electrolyte solutions in reactors with flowing volume-porous electrodes*: Ph.D. thesis: specialty 05.13.18 Mathematical modeling, numerical methods and program complexes. Federal state budgetary educational institution of higher education "Penza State Technological University". 2022:138 (In Russ.).

14. Varentsov V.K., Koshev A.N., Varentsova V.I., Kuzina V.V. *Carbon fiber electrodes: properties, modification, processes and electrolyzers. Mathematical modeling and optimization:* monography. Penza: Penza State University of Architecture and Civil Engineering; 2021 (In Russ.).

15. Varentsov V.K., Zherebilov A.F., Maley M.D. Carbon graphite fiber materials new electrodes for metal extraction from dilute solutions. 1. Nonwoven materials. *Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Ser. of chemical sciences*. 1984;17(6):120–127 (In Russ.).

16. Konkin A.A. *Carbon and other heat-resistant fiber materials*. Moscow: Chemistry; 1974 (In Russ.).

17. Newman J.S., Tiedemann W. Flow-through porous electrodes. *Adv. Electrochem. and Electrochemical Eng*. 1978;11:353–458.

18. Koshev A.N., Varentsov V.K., Chirkina M.A. Analysis of mathematical models and theory of polarization distribution of flowing volume-porous electrodes. *Surface physicochemistry and protection of materials*. 2009;45(4):441–448.

19. Beck R.Yu., Zamyatin A.P., Koshev A.N., Poddubny N.P. Mathematical modeling of the process of electrolytic separation of metal in the pores of the flowing volume-porous electrode. *Izv. SB AS USSR, ser. of chemical sciences*. 1980;2(1):203–213 (In Russ.).

20. Varentsov V.K., Koshev A.N., Varentsova V.I., Kuzina V.V. *Redox processes on flowing three-dimensional electrodes. Mathematical modeling. Theory. Experiment*: monography. Penza: Penza State University of Architecture and Civil Engineering; 2020 (In Russ.).

21. Pontryagin L.S., Boltyansky V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Mathematical theory of optimal processes*. Moscow: Science, 1969 (In Russ.).

22. Moiseev N.N. *Numerical methods in the theory of optimal systems*. Moscow: Science, 1971 (In Russ.).

23. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Numerical Methods*. Moscow: Laboratory of Basic Knowledge, 2001; 630. ISBN 5-93208-043-4 (In Russ.).

24. Daniel-Beck V.C. To the question of polarization of porous electrodes. On the distribution of current and potential inside the electrode. *Journal of Physical Chemistry*. 1948;22(6):697–710 (In Russ.).

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander N. Koshev – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Professor of the Department of Information and Computing Systems, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russia, ankoshev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3057-4980

Valentina V. Kuzina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Information and Computer Systems Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering, Penza, Russia, kuzina-vv@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-4511-7176

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander N. Koshev – scientific supervision; formulation of the task of mathematical modeling; development of modeling methodology; development of computer programs, text writing; final conclusions.

Valentina V. Kuzina – Mathematical modeling, development of computer programs, carrying out calculations; revision of the text; conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 12.03.2025; approved after reviewing 05.04.2025; accepted for publication 09.04.2025.

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья / Original article
УДК 691:51-74
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131

CC BY 4.0

Распределенная реакционная поверхность углеграфитовых объемно пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и нанокомпозиционных материалов

Александр Николаевич Кошев, Валентина Владимировна Кузина*
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: kuzina-vv@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Пористые композиционные и нанокомпозиционные материалы, рассматриваемые в данной публикации, представляют собой металлизированные углеграфитовые материалы, *в частности углеродные волокнистые материалы* (УВМ). При металлизации УВМ одной из актуальных задач является задача нанесения равномерного металлопокрытия на поверхность волокон УВМ по всему объему обрабатываемого материала. Одним из эффективных способов покрытия УВМ металлами и их сплавами является гальванический способ, позволяющий, кроме прочих достоинств, оптимизировать процесс как по элементам конструкции электролизера с проточными трехмерными электродами (ПТЭ), так и за счет правильного выбора режимов электроосаждения: гальванического, концентрационного, гидродинамического и пр. **Материалы и методы.** Для решения задач по расчету режимов работы и элементов конструкции электролизера, в частности, распределенной по толщине электролизера удельной реакционной поверхности УВМ, использованы методы математического моделирования процессов металлизации пористой среды и ранее опубликованные экспериментальные данные. **Результаты и обсуждение.** Выполнено развитие математических моделей процессов гальванической металлизации УВМ. Сформулированы краевые задачи математической физики, предложены методы расчета. Поставлены задачи оптимизации распределения удельной реакционной поверхности УВМ по толщине ПТЭ на основе электрохимической теории процессов в пористой среде, представлены пути их решения. Решены конкретные технологические задачи. Приводится сравнение полученных в результате моделирования наиболее эффективных значений распределения удельной реакционной поверхности УВМ по толщине ПТЭ с экспериментальными данными. Показана работоспособность моделей и методов для исследования процесса электроосаждения меди из сернокислого электролита. **Выводы.** Расчет закономерностей электрохимических процессов извлечения металлов в ПТЭ на основе разработанных математических моделей позволяет прогнозировать результаты электролиза, определять оптимальные режимы работы и элементы конструкции ПТЭ. Использование ПТЭ для металлизации УВМ с правильно распределенной реакционной поверхностью способствует получению композиционных материалов с заданными свойствами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углеграфитовый катод, композиционные и нанокомпозиционные материалы, процесс металлизации, распределенная реакционная поверхность, математическое моделирование, оптимизация

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 25-21-00135 «Моделирование процессов электрохимической металлизации пористых углеродных композиционных материалов с целью определения эффективных значений распределенных удельной реакционной поверхности и электропроводности проточного трехмерного электрода».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Кошев А.Н., Кузина В.В. Распределенная реакционная поверхность углеграфитовых объемно пористых катодов как параметр оптимизации процесса металлизации композиционных и нанокомпозиционных материалов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(2):119–131. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131. – EDN: XWDYCA.

© Кошев А.Н., Кузина В.В., 2025

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials

Alexander N. Koshev, Valentina V. Kuzina*
Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia
* Corresponding author: e-mail: kuzina-vv@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. The porous composite and nanocomposite materials discussed in this publication are metallized carbon-graphite materials, in particular carbon fiber materials (CFMs). At metallization of CFMs one of the actual problems is the task of applying uniform metal coating on the surface of CFMs fibers over the entire volume of the processed material. One of the most effective ways to coat CFMs with metals and their alloys is the galvanic method. This method allows, among other things, to optimize the process by optimizing both the design of the electrolyzer with flow-through three-dimensional electrodes (FTE) and the choice of electrodeposition modes, such as galvanic, concentration, and hydrodynamic. **Materials and methods.** Methods of mathematical modeling of porous medium metallization processes and previously published experimental data were used to solve problems on calculation of operating modes and elements of the electrolyzer design, in particular, the specific reaction surface of the UWM distributed over the thickness of the electrolyzer. **Results and discussion.** The development of mathematical models of the processes of electroplating metallization of CFMs is carried out. Boundary value problems of mathematical physics are formulated and calculation methods are proposed. Problems of optimization of distribution of specific reaction surface of CFMs by thickness of FTE on the basis of electrochemical theory of processes in porous medium are set, ways of their solution are presented. Specific technological problems are solved. The comparison of the most effective values of the distribution of specific reaction surface of CFMs over the thickness of FTE obtained as a result of modeling with the experimental data is given. The workability of models and methods for studying the process of copper electrodeposition from sulfuric acid electrolyte is shown. **Conclusion.** Calculation of regularities of electrochemical processes of metal extraction in FTE on the basis of the developed mathematical models allows to predict the results of electrolysis, determine the optimal modes of operation and elements of FTE design. The use of FTE for metallization of CFMs with properly distributed reaction surface contributes to obtaining composite materials with specified properties.

KEYWORDS: carbon-graphite cathode, composite and nanocomposite materials, metallization process, distributed reaction surface, mathematical modeling, optimization

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was financially supported by RSF within the framework of scientific project No. 25-21-00135 “Modeling of electrochemical metallization processes of porous carbon composite materials in order to determine the effective values of distributed specific reaction surface and electrical conductivity of the flowing three-dimensional electrode”.

FOR CITATION:
Koshev A.N., Kuzina V.V. Distributed reaction surface of carbon-graphite volume-porous cathodes as a parameter for optimizing of metallization process of composite and nanocomposite materials. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):119–131. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-119-131. – EDN: XWDYCA.

ВВЕДЕНИЕ

В различных областях промышленных производств высокотехнологичных изделий [1–9] используются композиционные материалы из углеродных волокнистых материалов (УВМ) с металлическим покрытием углеграфитовых нитей золотом, серебром, платиной, медью или другими металлами и их сплавами, выбранными с целью обеспечения заданных технологических требований.

Нанесение металлического покрытия на УВМ возможно различными методами, как химическими, так и механическими, однако наиболее эффективным методом металлизации твердой пористой основы представляется металлизация с использованием методов электролиза [10–14]. Гальваническая металлизация УВМ предпочтительна по ряду причин, основной из которых, безусловно, является возможность выбора режима электроосаждения: силы габаритного тока, скорости и направления протока

электролита, концентрации электроактивных веществ, конструкционных особенностей электролизера и прочих технологических условий. Выбор режимов электролиза, формы и материала катода, а также состава и концентрации электролита обуславливается требованиями к техническим параметрам создаваемого композиционного материала и технологическим параметрам процесса электроосаждения, к которым, в первую очередь, относятся равномерность распределения металла по толщине УВМ и интенсивность процесса осаждения.

Выполнить оптимизацию режимов электроосаждения и конструкционных особенностей электролизера с целью интенсификации металлизации и получения материалов с заданными свойствами невозможно без применения методов математического моделирования и расчета закономерностей электрохимических процессов и прогнозирования результатов электролиза [13]. Одной из основных характеристик, обеспечивающих значительную интенсификацию электроосаждения металла на УВМ в проточном трехмерном электроде (ПТЭ), представляется величина удельной реакционной поверхности электрода.

Электролиз металлов в электролизерах с ПТЭ осуществляется, как правило, из разбавленных растворов. Это позволяет использовать преимущества катодов из УВМ, такие как возможность вести процессы с высокой скоростью осаждения и достаточной степенью заполнения электрода металлом. Процесс металлизации УВМ лимитируется диффузией ионов к поверхности волокон. При этом толщина диффузионного слоя, ограничивающего скорость разряда ионов металла, для волокон диаметром 10 мкм принята равной 10^{-4} см [14, с. 19].

Очевидно, что при определении удельной реакционной поверхности УВМ должна учитываться не только общая боковая поверхность углеграфитовых волокон, но и те шероховатости поверхности (выступы, углубления и т.п.), размер которых в определяющих их высотах и глубинах составляет не менее толщины диффузионного слоя, т,е. величины, порядка 10^{-4} см.

В работах [14, 15] представлены результаты исследований, проведенных проф. В.К. Варенцовым с сотрудниками по определению величины S_v – реакционной поверхности УВМ при электроосаждении металлов в ПТЭ, лимитируемых диффузионной стадией гальванического процесса.

В табл. 1. приведены значения параметров некоторых нетканых и тканных УВМ: r – радиус волокна, S_v – удельная поверхность, определенная электро-

Таблица 1. Параметры углеродных волокнистых материалов

Материал	r, мкм	S_v, $см^{-1}$	к, См/см	ε
ВНГ-50	6,0	265	1,3/2,6	0,92
ВНГ-30	5,5	160	0,90/0,33	0,96
ВИНН-250	4,5	280	0,1/0,4	0,97
НТМ-200	5,0	216	0,07/0,4	0,96
НТМ-100	5,4	220	0,03/0,12	0,96
Мтилон	5,1	270	0,13/0,5	0,94
ВВП-66-95	4,7	255	0,006/0,05	0,96
ФРН	5,0	125	0,001/0,005	0,98
КНМ	6,1	160	0,009/0,03	0,98
ВИНН-150	5,0	220	0,05/0,16	0,92
КСС	4,5	–	0,1/0,2	0,89
Углен	5,1	240	0,05/0,13	0,95
Грален	4,9	260	0,1/0,4	0,96
НТ-1	6,2	165	0,001/0,02	0,90
НТ-2	6,2	165	0,003/0,014	0,90
АНМ	6,1	180	0,01/0,12	0,96
ТВШ	4,6	780	0,16/0,4	0,91
ТГН-2М	5,0	220	0,45/1,5	0,85
ЛВИК-95	6,0	270	0,26/0,87	0,83
ЛГ-50	3,8	150	0,02/0,09	0,76
ЛГ-30	3,7	180	0,64/2,1	0,78
ЛГ-10	3,4	170	0,44/1,4	0,77

химическим методом, $\varkappa$ – удельная электропроводность УВМ в свободном и сжатом в два раза состоянии (над чертой и под чертой, соответственно), ε – пористость УВМ [14, с. 22].

Результаты исследований, проведенных В.К. Варенцовым с сотрудниками и представленных в работе [14, с. 23], позволяют утверждать, что нетканые УВМ имеют существенно большую поверхность углеграфитовых волокон, на которой возможны электрохимические реакции, по сравнению с тканными УВМ.

Проведенная нами статистическая обработка данных из табл. 1 показывает, что наиболее значимыми факторами влияния на величину удельной реакционной поверхности S_v, являются радиус волокон r и пористость материала ε:

$$S_v = a_0 + a_r r + a_\varepsilon \varepsilon + a_{r\varepsilon} r\varepsilon. \quad (1)$$

На основании проведенных расчетов были определены коэффициенты регрессионной модели a_0, a_r, a_ε, $a_{r\varepsilon}$, при этом показано, что слагаемое $a_{r\varepsilon} r\varepsilon$ в соотношении (1) является гораздо менее значимым в сравнении с первым и вторым слагаемыми. Следовательно, зависимость реакционной поверхности S_v как функции от параметров a_0, a_r, a_ε можно принять линейной:

$$S_v = 3066{,}93 - 574{,}911r + 24{,}567\varepsilon. \quad (2)$$

Построенная модель может использоваться для оценки удельной поверхности, если известны радиус волокон и пористость УВМ, при этом следует заметить, что они получены для $4{,}5 \leqslant r \leqslant 6{,}1$ (мкм) и $92 \leqslant \varepsilon \leqslant 98\%$, поэтому их нельзя экстраполировать для r и ε, сильно выходящих за границы означенных интервалов. По этой же причине они могут оказаться малопригодными для определения удельной поверхности ПТЭ при электроосаждении металла, внутри пористого пространства, когда r и ε изменяются значительно.

В случае, когда радиус волокна УВМ, пористость материала и, как следствие, его удельная реакционная поверхность значительно меняются в процессе осаждения металла, необходимо учитывать эти изменения при математическом моделировании процесса электролиза.

Для нахождения зависимости удельной площади поверхности УВМ S_v от веса осадка металла M, в первом приближении, считалось, что осадок распределяется вдоль волокон равномерно. При известной пористости материала можно найти объем волокон, составляющих «таблетку» УВМ площадью 1 см^2 и толщиной 1 см, и определить n – число волокон в таблетке, полагая, что каждое из волокон представляет цилиндр известного радиуса r: $n = (1-\varepsilon)/(\pi r^2)$.

При осаждении M граммов металла с плотностью q, г/см^3, радиус волокон и пористость электрода становятся равными соответственно

$$r_M = \sqrt{r^2 + \frac{M}{\pi q n}}, \cdots \varepsilon_M = \varepsilon - \frac{M}{q}, \quad (3)$$

а удельная поверхность

$$S_v = 2\pi r_M n = \frac{2(1-\varepsilon)}{r}\sqrt{1 + \frac{M}{q(1-\varepsilon)}}. \quad (4)$$

Покажем величину изменения удельной реакционной поверхности от количества осажденного металла для $r = 5\cdot10^{-4}$ см, $\varepsilon = 0{,}95$. Для этих значений можно принять $n \approx 6\cdot10^4$. В начале процесса $r_M = r$, и из формулы (3) находим $S_v = 200$ см. Найдем S_v^{max}, когда на ПТЭ осаждено максимально достигаемое на практике количество металла. Для золота это приблизительно $M = 40$ г на 1 г УВМ. Считая плотность углеграфита равной 1,6 г/см^3 [16], нетрудно определить, что на рассматриваемый объем УВМ можно осадить 3,2 г металла. Для золота q = 19,6 г/см^3. Подставляя эти данные в (3), найдем $S_v^{max} \approx 413$ см^3. Таким образом определено, что в данном случае может происходить удвоение удельной поверхности ПТЭ за весь цикл осаждения металла из раствора. Очевидно, что при решении задач по определению технологических параметров процесса извлечения металлов на ПТЭ необходимо учитывать возможные изменения величин удельной поверхности, пористости, линейной скорости протока электролита и др. в динамике электролиза.

Для вычисления удельной реакционной поверхности S_v по уравнению (4) используем следующие рассуждения. Количество осажденного металла – ΔM за время работы ПТЭ – Δτ, в точке электрода – x, $0 \leqslant x \leqslant L$, в сечении ПТЭ, площадью равной единице, определится соотношением: $\Delta M = [M(x,\tau + \Delta) - M(x,\tau)]\Delta x$; концентрация ионов осаждаемого металла при протоке раствора электролита от точки x до точки $x + \Delta x$ понизится на величину $\Delta C = [C(x,\tau) - C(x + \Delta x,\tau)]$; концентрация ионов металла за единицу времени изменится на величину – $\Delta C m_v$, а количество металла, осажденного в единичном сечении ПТЭ в точке x толщиной Δx, следовательно, будет равным $\Delta C m_v \Delta\tau$.

Из очевидного соотношения $[M(x,\tau + \Delta\tau) - M(x,\tau)]\Delta x = \Delta C m_v \Delta t$, в пределах при $\Delta x \to 0$ и $\Delta\tau \to 0$, нетрудно получить формулу:

$$M(x,\tau) = m_v\, dx \int_0^\tau (\partial C(x,t)/\partial x)\, dt.$$

$M(x,\tau)$ – количество металла в точке x за время τ – будем использовать при расчете удельной поверхности $S_v(x,\tau)$ по формуле (4).

Представленные сведения позволяют сделать вывод о том, что удельная реакционная поверхность ПТЭ должна рассматриваться как один из параметров, подлежащих оптимизации. Более того, воз-

можность подбирать материалы для формирования ПТЭ (см. табл. 1) позволяет рассматривать катоды с распределенной по толщине ТПЭ удельной реакционной поверхностью. Отметим также, что изменить значение S_v возможно за счет сжатия или растяжения выбранного материала катода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель

Исходя из электрохимической теории [17], поток заряженных частиц i-го сорта N_i в многокомпонентном электролите ($i = 1, ..., n$) осуществляется под действием градиента потенциала электрического поля ∇E и протока электролита со скоростью v:

$$N_i = z_i \mu_i F C_i \nabla E + C_i v. \quad (5)$$

В этом соотношении z_i – заряд электроактивного компонента раствора; C_i – его концентрация; μ_i – подвижность.

В гомогенной среде справедливы условия материального баланса [17, 18], из которых следуют уравнения:

$$\partial C_i/\partial t = -(N_i), \quad (6)$$
$$\partial C_i/\partial t = -(z_i \mu_i F C_i \nabla E + C_i v). \quad (7)$$

Из (6) и (7) нетрудно получить уравнение (8):

$$F \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{-\partial\left(\kappa \frac{dE}{dx}\right)}{\partial x} - vF \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} F \sum z_i C_i. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что в преобразованиях уравнения (5) до системы дифференциальных уравнений (8) математическое моделирование проведено в соответствии с предположением о протекании реакции осаждения в каждой точке псевдогомогенного электродного пространства. Следовательно, концентрация ионов металла изменяется по мере движения электролита в объеме ПТЭ, то есть $\partial C_i/\partial x \neq 0$ в каждой точке с координатой x по толщине ПТЭ.

Моделируя изменение концентрации ионов металла по толщине ПТЭ $\partial C_i/\partial x$ с учетом зависимости удельной реакционной поверхности от координаты x по толщине электрода $S = S_v(x)$, аналогично описанному в [18], получим соотношение в виде дифференциального уравнения, где в правой части присутствует неизвестная функция J_{Si} – распределенная плотность поляризующего тока:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{-S_V(x)}{|v|z_i F} J_{Si}(x). \quad (9)$$

С учетом соотношения (9), уравнение (8) преобразуется к виду

$$F \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{-\partial\left(\kappa \frac{dE}{dx}\right)}{\partial x} - S_V(x) \sum J_{Si} - \frac{\partial v}{\partial x} F \sum z_i C_i. \quad (10)$$

Считая, аналогично [18, 20], $\varkappa = 1/\rho = 1/(\rho_s + \rho_l)$ и $\rho_s = 1/\varkappa_s$, $\rho_l = 1/\varkappa_l$, преобразуем уравнение (10):

$$F \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial\left(\frac{\kappa_S \cdot \kappa_L}{\kappa_S + \kappa_L} \frac{dE}{dx}\right)}{\partial x} + S_V(x) \sum J_{Si} + \frac{\partial v}{\partial x} F \sum z_i C_i. \quad (11)$$

Система уравнений (9), (11) дополняется кинетическими уравнениями, связывающими J_{Si} и E [18, 20]:

$$J_{Si}(x) = j_{0i} \frac{e^{\alpha_i z_i F((E-\varphi_{Ri})/RT} - e^{(\alpha_i - 1) z_i F(E-\varphi_{Ri})/RT}}{1 + j_{0i} e^{\alpha_i z_i F(E-\varphi_{Ri})/RT} / z_i F K_m C_i}. \quad (12)$$

Здесь φ_{Ri} – это равновесный потенциал i-й реакции.

Граничные и начальные условия для системы (9), (11), (12) можно представить следующими соотношениями:

$$\partial E/\partial n\,(\tau,0) = J_g(\tau)\,\rho_s;\ \partial E/\partial n\,(\tau,l) = -J_g(\tau)\,\rho_l;$$
$$C_i(\tau,0) = C_{0i}. \quad (13)$$

Здесь $J_g(\tau)$ – габаритная плотность тока, подаваемого на электрод в момент времени τ, C_{0i} – концентрация i-го электроактивного компонента в подаваемом в систему электролите. Отметим, что дифференциальное уравнение (11), в отличие от ранее используемых нами дифференциальных моделей, содержит в себе распределенную по толщине электрода величину удельной реакционной поверхности $S(x)$. Такой подход влечет за собой необходимость существенной корректировки алгоритма и компьютерной программы расчета по модели (9), (11)–(13) в сторону усложнения.

На рис. 1. представлена схема ПТЭ с катодом из трех слоев УВМ различного типа.

Система уравнений (9), (11)–(13) позволяет рассчитывать распределенные по толщине ПТЭ неизвестные электрохимические функции: потенциал, плотность тока, концентрацию при распределенной, первоначально известной функции $S_v(x)$ – удельной реакционной поверхности ПТЭ при извлечении металлов из многокомпонентного электролита. Для выяснения закономерностей и влияния $S_v(x)$ на результирующие показатели процесса вполне допустимо исследовать поведение системы с ПТЭ для электролита с одним электроактивным компонентом, т.е. когда количество компонентов $n = 1$.

В качестве еще одного упрощения рассмотрим ситуацию, при которой $C(\tau,x)$ представима в виде кусочно-постоянной функции от времени τ, то есть, когда весь интервал процесса может быть представлен объединением подинтервалов, в каждом из которых изменение концентрации от τ можно считать усредненно постоянным.

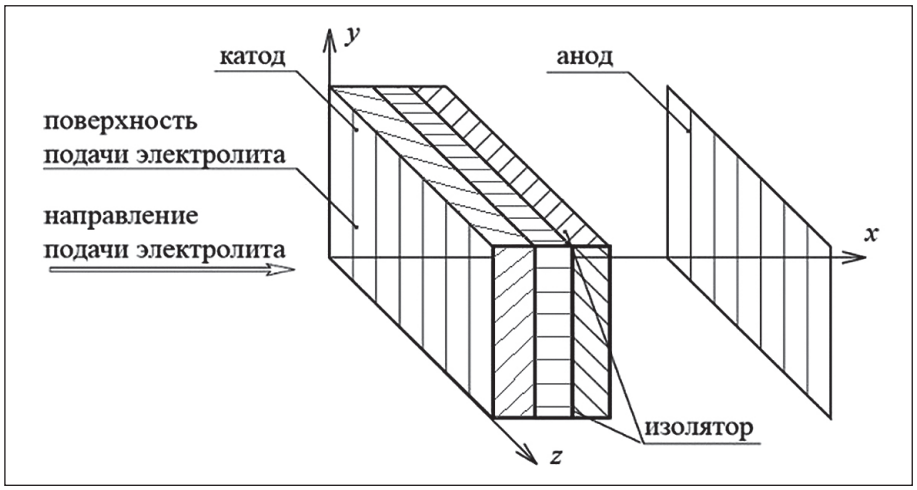


Рис. 1. Схема проточного трехмерного электрода с катодом из трех слоев УВМ

С учетом принятых упрощений рассматриваемая задача электролиза в ПТЭ запишется в следующей стационарной форме:

$$\frac{d^2E}{dx^2} = \frac{-\kappa_l \frac{d\kappa_S}{dx}}{\kappa_S(\kappa_S+\kappa_l)}\frac{dE}{dx} + S_v(x)\left(\frac{1}{\kappa_S}+\frac{1}{\kappa_l}\right)J_S(x), \qquad (14)$$

$$\frac{dC}{dx} = \frac{-S_v(x)}{vzF}J_S(x) \qquad (15)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x}(0) = \frac{1}{\kappa_S}J, \frac{\partial E}{\partial x}(L) = \frac{1}{\kappa_l}J, C(0) = C_0, \qquad (16)$$

J – общая электродная плотность тока.

С целью численной реализации модели (9), (11)–(13) разработан комплекс программ, при написании которого использовались алгоритмические языки программирования Delphi и Object Pascal.

Постановка задачи оптимизации

Рассмотрим задачу по расчету оптимального распределения удельной реакционной поверхности по толщине проточного объемно пористого электрода как задачу оптимального математического управления электрохимическим процессом за счет выбора оптимального управляющего воздействия $u(x) = S_v(x)$. Обозначим:

$$a = \frac{zF}{RT};\ b = \frac{j_0}{zFK_m};\ d = \frac{1}{vzF};\ g = \left(\frac{1}{\kappa_S}+\frac{1}{\kappa_l}\right);$$

$$E = y_1;\quad \frac{dy_1}{dx} = y_2 = f_1(y_1, y_2, y_3, u);$$

$$\frac{dy_2}{dx} = \frac{-\kappa_l \frac{d\kappa_S}{dx}}{\kappa_S(\kappa_S+\kappa_l)}y_2 + u(x)\left(\frac{1}{\kappa_S}+\frac{1}{\kappa_l}\right)j_S(x) =$$
$$= f_2(y_1, y_2, y_3, u);$$

$$y_3(x) = C(x); \frac{dy_2}{dx} = -\frac{u(x)}{vzF}J_S(x) = f_3(y_1, y_2, y_3, u).$$

Уравнения (14)–(16) примут вид:

$$dy_i/dx = f_i(y_1, y_2, y_3, u),\ i = 1, 2, 3 \qquad (17)$$

с граничными условиями:

$$y_2(0) = (1/\varkappa_s)J;\ y_2(L) = (1/\varkappa_l)J;\ y_3(0) = C_0. \qquad (18)$$

Задача оптимального математического управления в общем случае состоит в определении расчетным путем управляющей вектор-функции $u(x)$, обеспечивающей выполнение критерия наилучшей при данных условиях равномерности распределения плотности поляризующего тока или потенциала по толщине ПТЭ.

Критерий равномерности распределения функции $J_S(x)$ можно сформулировать различными способами. В данной работе предлагается следующая форма:

$$\sigma(u) = \int_0^L \left(\frac{J}{L} - J_S(y_1, y_3)\right)^2 dx \to \min. \qquad (19)$$

Метод решения задачи

Для решения задачи оптимального математического управления (17)–(19) предлагается использовать принцип максимума Л. С. Понтрягина [21, 22]. Кроме очевидных преимуществ, заключающихся, например, в несложной алгоритмизации принципа максимума, необходимо отметить следующее обстоятельство. В работах [13, 20] были представлены исследования устойчивости системы дифференциальных уравнений (17), показано, что система является неустойчивой, к вариации начальных данных и функций в правой части системы. То есть, при проведении расчетов по моделирующим уравнениям, при значительных величинах толщины ПТЭ может возникнуть необходимость в применении регуляри-

зирующих методов. Известно, что принцип максимума Понтрягина обладает выраженными регуляризирующими свойствами [22].

Для реализации метода Л.С. Понтрягина систему (17)–(19) необходимо дополнить уравнением, соответствующим критерию оптимизации управления (19) и, сопряженной к уравнениям (17), системой дифференциальных уравнений относительно неизвестных функций $\psi_i(x)$ $i = 0, ..., 2$, связанных с основными функциями дифференциальных соотношений и задаваемыми методом начальными условиями:

$$dy_0/dx = ((J/L) - J_S(y_1, y_3))^2 = f_0(y_1, y_3, u);$$
$$y_0(0) = 0, \quad (20)$$

$$d\psi_i/dx = -\sum_{j=0}^{3}\psi_j(\partial f_j/\partial y_i),\ i = 0, ..., 3;$$
$$\psi_0(0) = 1;\ \psi_1(L) = \psi_2(L) = \psi_3(L) = 0. \quad (21)$$

Правые части в уравнениях (21) для вычисления производных $d\psi_i/dx$ не требуют сложных преобразований и могут быть представлены в аналитическом виде, несложном для алгоритмизации и программирования при вычислениях на ПЭВМ, однако результирующие формулы громоздки и в данной работе по этой причине не приводятся.

В соответствии с методом С.Л. Понтрягина, оптимальным управление $u(x)$ будет в том и только в том случае, если его значения минимизируют так называемую функцию Гамильтона [21–23]:

$$H(x, y_0(x), ..., y_3(x), \psi_0(x), ..., \psi_3(x), u(x)) =$$
$$\sum_{i=0}^{3}\psi_i(x, y_i, u) f_i(x, \psi_i, u). \quad (22)$$

Минимизацию функции Гамильтона удобно осуществлять известным методом многомерного градиентного спуска. Предположим, что мы выполнили k итераций поиска, т.е. вычислили вектор $u^k(x) = (u_1^k, u_2^k, ..., u_m^k)$.

Численные значения функций $u^k(x)$ позволяют решить систему (20)–(21), например, классическим методом Рунге–Кутты или любым другим методом [23]. Далее возвращаемся к вычислению $u^{k+1}(x)$ посредством выполнения следующего шага минимизации функции Гамильтона и так до конца итерационного процесса, заканчивающегося, когда функция Гамильтона не меняется от итерации к итерации в пределах заданной точности.

Решение задачи оптимизации распределения управляющего воздействия $u(x) = S_v(x)$ в некоторых специфических условиях.

При решении практических задач извлечения металла на ПТЭ и металлизации УВМ нередко можно принять следующие предположения и упрощения. Во-первых, можно считать, что изменение электропроводности УВМ по толщине ПТЭ в процессе электролиза незначительно, то есть $d\varkappa_s/dx \approx 0$, и первым слагаемым в уравнении (14) и последующими можно пренебречь. Во-вторых, за критерий равномерности распределения процесса электролиза по толщине ПТЭ принять равномерность распределения потенциала электрода.

Далее предположим, что задача по отысканию управляющего воздействия $u(x) = S_v(x)$ решена, и распределение плотности тока электроосаждения металла близко к равномерному: $J_S(x) = J_m$. В этом случае можно считать, что распределение концентрации электроактивного вещества по толщине электрода близко к равномерному, и третьим уравнением в системе (17) можно пренебречь. Тогда задача (17)–(22) упрощается к виду:

$$\begin{cases} dy_0/dx = |E(x) - E_m|; \\ dy_1/dx = y_2; \\ dy_2/dx = u(x)(1/\varkappa_s + 1/\varkappa_l)\, J_m; \\ \psi_0(x) = 1; \\ d\psi_1/dx = \mathrm{sign}(E - E_m); \\ d\psi_2/dx = -\psi_1; \\ y_0(0) = 0;\ y_2(0) = (1/\varkappa_s)\, J;\ y_2(L) = (1/\varkappa_l)\, J; \\ \psi_0(0) = 1;\ \psi_1(L) = \psi_2(L) = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Для такой постановки задачи функция Гамильтона выглядит следующим образом:

$$H(x, y_0, y_1, y_2, \psi_0, \psi_1, \psi_2, u) = -|E(x) - E_m| +$$
$$+ \psi_1 y_2 + \psi_2 u(x)(1/\varkappa_s + 1/\varkappa_l) j_m. \quad (24)$$

Из системы уравнений (23) нетрудно определить:

$$\psi_1(x) = (x - L)\,\mathrm{sign}(E - E_m), \quad (25)$$

$$\psi_2(x) = 1/2\,(x - L)^2\,\mathrm{sign}(E - E_m) \quad (26)$$

и, следовательно,

$$H = -|E(x) - E_m| + (x - L)\,\mathrm{sign}(E - E_m)\, y_2 +$$
$$+ 1/2\,(x - L)^2\,\mathrm{sign}(E - E_m)\,\mathrm{u}(1/\varkappa_s + 1/\varkappa_l)\, J_m. \quad (27)$$

Анализируя соотношение (27), нетрудно видеть, что управляющее воздействие $u = S_v$ входит в выражение для функции Гамильтона линейно, и вычисление частной производной H по этой переменной, с последующим приравниванием этой производной нулю, к решению задачи не приводит. Однако заметим, что функция $H = H(u)$ будет иметь минимум, когда третье слагаемое в выражении (27) будет минимальным. Учитывая известный U-образный вид функции распределения потенциала $E(x)$ по толщине электрода [24], можно заключить, что в случае, когда $E > E_m$, значение $u(x) = S_v(x)$ должно быть минимально, а при $E < E_{cp}$ – максимально возможным.

Из этого следует, что предпочтительной с точки зрения равномерности распределения потенциала ПТЭ по толщине является ситуация, когда начальные слои УВМ имеют меньшую удельную реакционную поверхность, далее, в средней части электрода – большую и затем снова меньшую.

Пример решения задачи эффективного подбора слоев УВМ объемно пористого катода с целью улучшения равномерности распределения осажденного металла по толщине ПТЭ.

Рассмотрим результаты расчетного и экспериментального распределения осадка меди в ПТЭ толщиной 6 мм при использовании в качестве материала катода УВМ марки АМН (рис. 2) и ВНГ-50 (рис. 3), величины удельной реакционной поверхности которых значительно различаются: 180 $см^{-1}$ и 265 $см^{-1}$ соответственно. Необходимо заметить, что, как и ранее, все результаты экспериментальных исследований получены профессором В.К. Варенцовым и опубликованы, например, в работах [14, 20]. Состав электролита (г/л): $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ – 170, H_2SO_4 – 25, $(NH_4)_2SO_4$ – 80; удельная электропроводность 0,101 См/см; концентрация ионов меди 0,16 ±0,03 г/л. Осаждение меди осуществлялось при габаритной плотности тока 500 $А/м^2$. На рис. 2 и рис. 3 красные кусочно-линейные функции соответствуют эксперименту, синие – расчету при продолжительности электролиза, мин: а, б – 60, в, г – 180, – со скоростью протока электролита, см/с: а, в – 0,4, б, г – 1,0.

Результаты расчетов и экспериментальные данные, приведенные на рис. 2 и рис. 3, хорошо согласуются между собой. Можно также отметить, что при металлизации углеграфитового катода, составленного из УВМ марки ВНГ-50, общее количество осажденного металла превосходит общее количество металла, осажденного на катод, составленный из УВМ марки АМН, что объясняется лучшей удельной электропроводностью материала марки ВНГ-50. При этом нетрудно видеть, что распределение меди по толщине катода из УВМ марки АМН более равно-

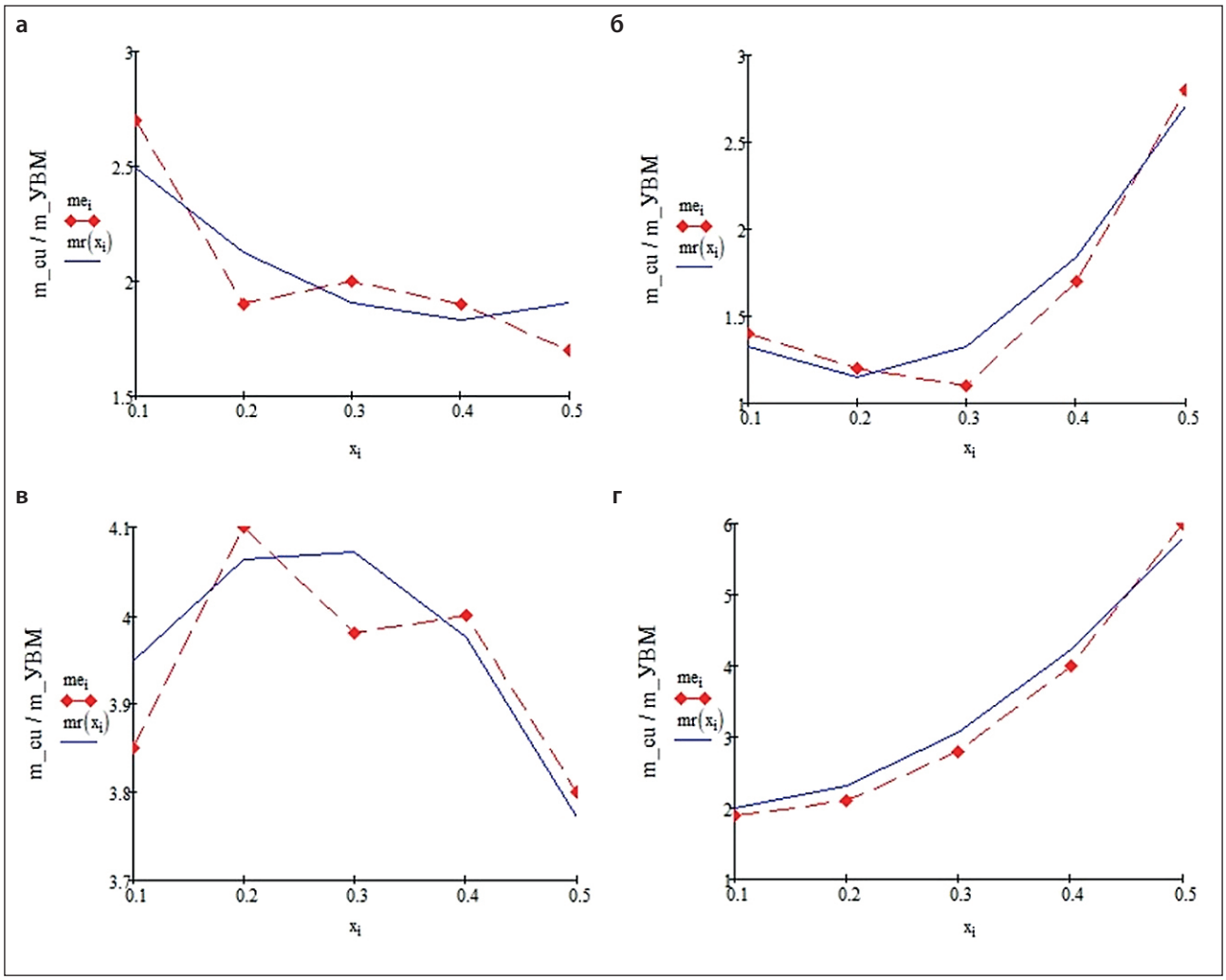


Рис. 2. Распределение металла по толщине УВМ марки АНМ

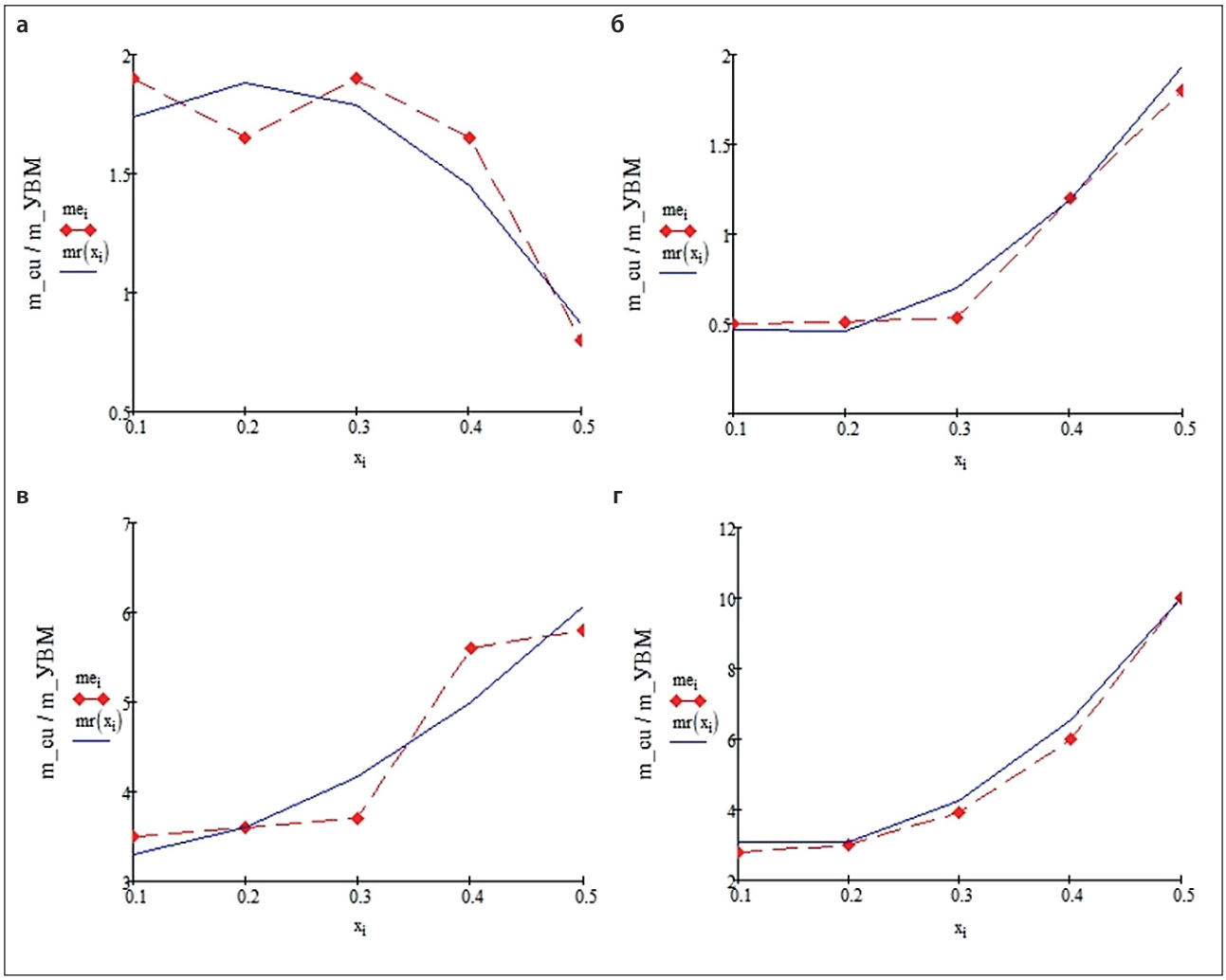


Рис. 3. Распределение металла по толщине УВМ марки ВНГ-50

мерное, чем распределение меди по толщине катода из УВМ марки ВНГ-50.

В соответствии с теоретическими выводами, приведенными выше, можно предположить, что для улучшения равномерности распределения медного покрытия ПТЭ можно было бы использовать объемно-пористый катод, составленный из трех слоев УВМ в следующей последовательности: первый слой – из УВМ марки АМН, второй слой – из УВМ марки ВНГ-50 и третий слой – опять из УВМ марки АМН.

На рис. 4 представлены расчетные данные распределения медного осадка в ПТЭ, состоящем из трех слоев УВМ: АМН; ВНГ-50; АМН.

Численная обработка результатов расчетов, приведенных на рис. 2–4, позволила составить табл. 2, данные которой отражают показатели равномерности распределения меди по толщине ПТЭ для рассмотренных условий, приведенных в подписях к означенным рисункам. Здесь max/min -показатель равномерности распределения осадка: max – наибольшая толщина осадка, min – минимальная толщина осадка, при различных условиях и конструкционных особенностях объемно пористого катода.

Основной вывод, который следует из анализа результатов расчетов наилучшего распределения меди по толщине проточного объемно пористого катода, заключается в том, что во всех сериях расчетов наилучший показатель равномерности распределения медного осадка в ПТЭ наблюдается в случае использования катода, составленного из трех слоев УВМ марок АМН, ВНГ-50, АМН, последовательно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе предлагается подход к решению задачи улучшения равномерности металлического покрытия в объеме углеродного волокнистого материала, являющегося основой композиционного и нано-

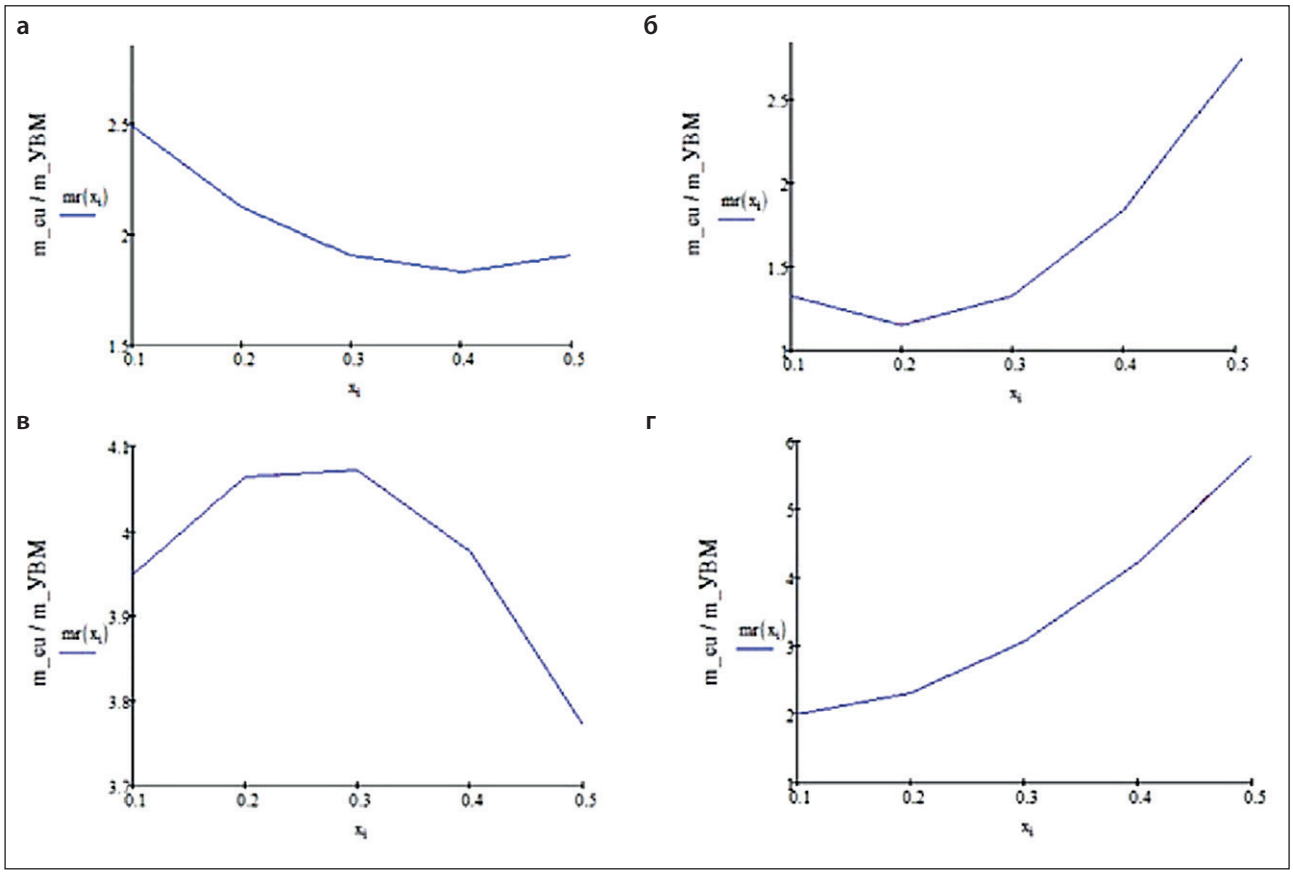


Рис. 4. Распределение медного осадка в ПТЭ из трех слоев УВМ – АМН; ВНГ; АМН: а – скорость протока электролита $v = 0{,}4$ см/с, время электролиза $t = 60$ с; б – $v = 1$ см/с, $t = 60$ с; в – $v = 0{,}4$ см/с, $t = 180$ с; г – $v = 1$ см/с, $t = 180$ с

Таблица 2. Значение показателя равномерности (max/min) распределения медного осадка по толщине ПТЭ

1-й слой УВМ	2-й слой УВМ	1-й слой УВМ	Скорость потока, *v*, см/с	Время электролиза, *t*, с	max/min
АМН	АМН	АМН	0,4	60	1,40
ВНГ-50	ВНГ-50	ВНГ-50	0,4	60	2,05
АМН	ВНГ-50	АМН	0,4	60	1,30
АМН	АМН	АМН	1,0	60	2,30
ВНГ-50	ВНГ-50	ВНГ-50	1,0	60	4,44
АМН	ВНГ-50	АМН	1,0	60	2,16
АМН	АМН	АМН	0,4	180	1,20
ВНГ-50	ВНГ-50	ВНГ-50	0,4	180	1,88
АМН	ВНГ-50	АМН	0,4	180	1,07
АМН	АМН	АМН	1,0	180	2,75
ВНГ-50	ВНГ-50	ВНГ-50	1,0	180	3,34
АМН	ВНГ-50	АМН	1,0	180	2,60

композиционного материала, при гальванической металлизации УВМ за счет правильного формирования ПТЭ из слоев УВМ различных марок с разными величинами удельной реакционной поверхности.

Задача решается методом математического моделирования и последующего расчета с использованием классического принципа максимума Л.С. Понтрягина, позволяющего сформулировать и решить задачу оптимизации распределения потенциала, плотности тока и металлического осадка по толщине ПТЭ. При этом за управляющее воздействие принята распределенная удельная электропроводность электрода.

При разработке математических моделей, описывающих гальванические процессы в ПТЭ, учтено возможное изменение характерных электрохимических и технологических параметров, в том числе и удельной реакционной поверхности УВМ в процессе электролиза за счет изменения структуры УВМ при металлизации углеграфитовых нитей.

С использованием элементов регрессионного анализа построены и исследованы уравнения регрессии, связывающие значения удельной реакционной поверхности УВМ в зависимости от величины радиуса углеграфитового волокна и пористости углеграфитового материала.

Использование естественных упрощений и преобразований позволило привести математические описания к виду систем обыкновенных дифференциальных уравнений, что, в свою очередь, дало возможность представить и решить задачу оптимизации в аналитической форме и сформулировать некоторые практические рекомендации по использованию катодов из УВМ с распределенной реакционной поверхностью.

В качестве примеров решены практические задачи расчета распределения медного осадка при металлизации УВМ различных марок, показано, что использование катода из УВМ трех слоев обеспечивает более равномерное распределение металла по толщине электрода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка математических моделей на основе современных положений электрохимической теории электроосаждения металлов на проточные углеграфитовые катоды и методов математического моделирования позволяет описывать процессы электролиза в ПТЭ в виде краевых задач математической физики, для решения которых необходимо использовать математический аппарат высокого уровня. В то же время разработанные математические модели позволяют формулировать задачи оптимизации процессов металлизации углеродных волокнистых материалов за счет оптимального распределения удельной реакционной поверхности по толщине проточного трехмерного электрода.

Математическое моделирование и численные методы расчета в рассматриваемом случае представляют собой эффективный научный метод для исследования и отыскания параметров оптимального управления электрохимическими процессами в пористой среде. Представленные методы и алгоритмы могут быть использованы как инструмент для теоретических исследований закономерностей электроосаждения металлов в ПТЭ и для численных расчетов оптимальных технологических параметров процесса электролиза и элементов конструкции электролизера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маслий А.И., Александрова Т.П., Медведев А.Ж., Белобаба А.Г. Синтетические волокнистые материалы с металлическими и металлосодержащими нанослоями: способы получения и области применения. *Фундаментальные и прикладные вопросы электрохимического и химико-каталитического осаждения металлов и сплавов*: Сб. тезисов докладов I Междунар. конференции. М.: ИФХЭ РАН, 2017: 62. EDN: UZYWPC

2. Нелюб В.А., Городецкий М.А. Алгоритм определения оптимальной толщины металлического покрытия при изготовлении углепластиков. *Современные наукоемкие технологии*. 2019;2:123–127. EDN: YYIVEL

3. Петюшик Е.Е., Евтухова Т.Е., Клевченя Д.И., Романенков В.Е., Афанасьева Н.А., Пинчук Т.И. Композиционный проницаемый материал на основе углеродного волокна. *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*. 2013;56(5):99–104. EDN: QBWEQF

4. Шуклин С.Г., Макарова Л.Г., Госвами Й.С. Создание нанокомпозитов на основе полиэфирной смолы, содержащей наноалмазы и углеродные нанотрубки. *Актуальные проблемы науки и техники*: Материалы I Междунар. НТК. Ижевск, 2021:172–175. EDN: DYHAYG

5. Юдина Т.Ф., Строгая Г.М., Ершова Т.В., Сусова Л.Л., Бейлина Н.Ю. Химическая металлизация углеродных материалов с развитой поверхностью. *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*. 2012;55(6):34–37. EDN: OYYVZV

6. Böttger-Hiller F., Nier M., Lampke T. Metal-Coated Carbon Fibres for Multifunctional CFRPs. *Journal of Object Technology – International Surface Technology*. 2014;7(1):44–45. https://doi.org/10.1365/s35724-014-0232-9

7. Grechushkina D.E., Nelyub V.A. Study of the kinetics of the flow of epoxy binders over the surface of a carbon fiber with a metal coating. *Steel in Translation*. 2023;53(2):134–137. https://doi.org/10.3103/s0967091223020079

8. Malashin I., Tynchenko V., Gantimurov A., Nelyub V., Borodulin A. A multi-objective optimization of neural networks for predicting the physical properties of textile polymer composite materials. *Polymers*. 2024;16(12):1752. https://doi.org/10.3390/polym16121752

9. Minakov G.S., Shirokikh S.A., Kornilov D.Yu., Koroleva M.Yu. Porous polymer nanocomposite materials for environmental protection. *Chemistry for Sustainable Development*. 2022;30(1):52–63. https://doi.org/10.15372/CSD2022358

10. Аверичев О.А., Постнова Е.Ю., Галышев С.Н. Электроосаждение медных покрытий на углеродное волокно из пирофосфатного электролита. *Фундаментальные и прикладные вопросы электрохимического и химико-каталитического осаждения металлов и сплавов*: Сб. тезисов докладов III Междунар. конференции. М.: ИФХЭ РАН, 2024:46 EDN: GCJREF

11. Атанов Б.И., Постнова Е.Ю., Галышев С.Н. Электрохимическое нанесение никелевого покрытия из сульфатного электролита на углеродное волокно. *Фундаментальные и прикладные вопросы электрохимического и химико-каталитического осаждения металлов и сплавов*: Сб. тезисов докладов III Междунар. конференции. М.: ИФХЭ РАН, 2024:48.

12. Кузина В.В., Самченко С.В., Козлова И.В., Кошев А.Н. Математическое моделирование физико-химических процессов в пористых средах при решении задач создания нанокомпозиционных материалов и влагонаполнения. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(4):298–309. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-298-309 EDN: NIOSQQ

13. Гвоздева И.Г. *Математическое моделирование процессов извлечения металлов из растворов электролитов в реакторах с проточными объемно-пористыми электродами*: дис. к.т.н.: специальность 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет». 2022:138. EDN: RCZDKT

14. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Варенцова В.И., Кузина В.В. *Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация*: монография. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та архитектуры и строительства, 2021. EDN: DBFNZZ

15. Варенцов В.К., Жеребилов А.Ф., Малей М.Д. Углеграфитовые волокнистые материалы новые электроды для извлечения металлов из разбавленных растворов. 1. Нетканые материалы. *Известия СО АН СССР. Сер. химических наук*. 1984;17(6):120–127.

16. Конкин А.А. *Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы*. М.: Химия, 1974.

17. Newman J.S., Tiedemann W. Flow-through porous electrodes. *Adv. Electrochem. and Electrochemical Eng*. 1978;11:353–458.

18. Кошев А.Н., Варенцов В.К., Чиркина М.А. Анализ математических моделей и теория распределения поляризации проточных объемно-пористых электродов. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2009;45(4):441–448. EDN: KPTOFV

19. Бек Р.Ю., Замятин А.П., Кошев А.Н., Поддубный Н.П. Математическое моделирование процесса электролитического выделения металла в порах проточного объемно-пористого электрода. *Изв. СО АН СССР, сер. хим. наук*. 1980;2(1):203–213.

20. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Варенцова В.И., Кузина В.В. *Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент*: монография. Пенза, ПГУАС, 2020. EDN: BSBHVQ

21. Понтрягин Л.С. Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. *Математическая теория оптимальных процессов*. М.: Наука, 1969.

22. Моисеев Н.Н. *Численные методы в теории оптимальных систем*. М.: Наука, 1971.

23. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. *Численные методы*. 9-е изд. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2020.

24. Даниель-Бек В.С. К вопросу о поляризации пористых электродов. О распределении тока и потенциала внутри электрода. *ЖПХ*. 1948;22(6):697–710.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кошев Александр Николаевич – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры Информационно-вычислительных систем, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия, ankoshev@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3057-4980

Кузина Валентина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационно-вычислительных систем, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия, kuzina-vv@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-4511-7176

ВКЛАД АВТОРОВ

Кошев А.Н. – научное руководство, постановка задачи математического моделирования, развитие методологии моделирования, участие в разработке компьютерных программ и их реализации, написание исходного текста; итоговые выводы.

Кузина В.В. – математическое моделирование, разработка компьютерных программ, проведение расчетов, доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025; одобрена после рецензирования 05.04.2025; принята к публикации 09.04.2025.

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-132-150

CC BY 4.0

Determination of the effective parameters of a triangular corrugated web for crane runway beams

Dias A. Okanov[1], Aleksandr A. Bryantsev[1], Mehmet B. Bozkurt[2], Sayat E. Niyetbay[1, 3]*, Zhangazy N. Moldamuratov[1, 4]*

[1] International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan
[2] Manisa Celal Bayar University, Şehit Prof. Dr. İlhan Varank Campus, Yunusemre/Manisa, Turkey
[3] Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[4] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

* Corresponding author: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to investigate the performance of crane runway beams with triangular corrugated webs. These beams are increasingly popular in industrial construction because of to their enhanced shear resistance and structural efficiency. Flat webs have several disadvantages, including high stress levels and excessive material consumption. Optimizing the geometry of corrugations makes it possible to improve strength and reduce the overall construction cost. **Methods and Materials.** The study is based on numerical modeling using the finite element method (FEM) in LIRA-CAD 2022 software and full-scale experimental testing. The performance of beams with both corrugated and flat webs was analyzed under wheel loads from cranes with lifting capacities of 10, 30, and 50 tons. Deformations and the distribution of normal and shear stresses were evaluated. **Results and Discussion.** The numerical model demonstrated high accuracy, with a maximum deviation of only 2.9% from experimental results. Crane runway beams with corrugated webs exhibited lower shear and normal stresses, reduced deflections, and more uniform force distribution. They also proved to be more economical due to lower material consumption and reduced labor intensity. Additionally, the corrugated beams showed enhanced economic performance, reducing material costs. **Conclusion.** Triangular corrugated web beams outperform traditional flat web beams in structural and economic terms. The findings support the use of optimized corrugation profiles to increase load-bearing capacity and reduce production costs. These results are relevant for optimizing crane beam design in industrial structures.

KEYWORDS: crane runway beam, flat web, corrugated web, static load, overhead crane, shear force, normal stresses, shear stresses, cost analysis

FOR CITATION:
Okanov D.A., Bryantsev A.A., Niyetbay S.E., Bozkurt M.B., Moldamuratov Zh.N. Determination of the effective parameters of a triangular corrugated web for crane runway beams. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):132–150. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-132-150. – EDN: YIYSOF.

Определение эффективных параметров треугольной гофрированной стенки подкрановых балок

Диас Алматович Оканов[1], Александр Александрович Брянцев[1], Мехмет Бакир Бозкурт[2], Саят Ержанулы Ниетбай[1, 3]*, Жангазы Нуржанович Молдамуратов[1, 4]*

[1] Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан
[2] Университет Маниса Джелал Баяр, кампус имени шахида проф. д-ра Илхана Варанка, Юнусемре/Маниса, Турция
[3] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
[4] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

© Okanov D.A., Bryantsev A.A., Niyetbay S.E., Bozkurt M.B., Moldamuratov Zh.N., 2025

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — изучить поведение подкрановых балок с треугольными гофрированными стенками, которые находят все более широкое применение в промышленном строительстве благодаря повышенной устойчивости к сдвигу и конструктивной эффективности. Плоские стенки имеют ряд недостатков — высокие напряжения и большой расход. Оптимизация геометрии гофров позволяет повысить прочность и снизить себестоимость конструкции. **Методы и материалы.** Работа основана на численном моделировании методом конечных элементов (МКЭ) в программе LIRA-CAD 2022 и полномасштабных экспериментальных испытаниях. Была исследована работа балок с гофрированной и плоской стенкой при нагрузках от кранов грузоподъемностью 10, 30 и 50 тонн. Оценивались деформации и распределение напряжений и сдвига. **Результаты и обсуждение.** Расчетная модель продемонстрировала высокую точность (максимальное отклонение от эксперимента – 2,9%). Подкрановые балки с гофрированной стенкой показали меньшие касательные и нормальные напряжения, меньшие прогибы и более равномерное распределение усилий. Также они оказались более экономичными за счет меньшего расхода. **Заключение.** Гофрированные балки с треугольным профилем превосходят балки с плоской стенкой как по прочностным, так и по экономическим характеристикам. Исследование подтверждает целесообразность применения гофрированных стенок в проектировании подкрановых балок для повышения несущей способности и оптимизации затрат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подкрановая балка, плоская стенка, гофрированная стенка, статическая нагрузка, мостовой кран, поперечная сила, нормальные напряжения, касательные напряжения, экономический анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Оканов Д.А., Брянцев А.А., Бозкурт М.Б., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н. Определение эффективных параметров треугольной гофрированной стенки подкрановых балок. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):132–150. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-132-150. – EDN: YIYSOF.

INTRODUCTION

The primary objective of this research is to investigate the performance and deformability of welded crane runway beams with triangular corrugated webs. To address this problem, several key objectives must be achieved: (1) to determine the optimal web configuration for three crane runway beams of different sizes under three loading conditions: a load of 0.95 kN per wheel from a 10-ton capacity overhead crane for the first type of crane runway beam, a load of 2.25 kN per wheel from a 30-ton capacity overhead crane for the second type, and a load of 3.35 kN per wheel from a 50-ton capacity overhead crane for the third type (2) to identify the most efficient corrugation parameters and (3) to compare the weight, labor intensity, and economic efficiency of crane runway beams with flat and corrugated webs.

Corrugated web I-section steel beams have gained attention in structural engineering due to their potential to enhance shear resistance while maintaining overall structural efficiency. This study explores the impact of web corrugation on the flexural and shear performance of crane runway beams through numerical simulations and experimental validation. Using Lira-CAD (Lira-Computer-aided design software), finite element models were developed to analyze simply supported and cantilever beam configurations under concentrated and uniform loading. The results indicate that while corrugated webs have a negligible effect on flexural resistance, they significantly improve shear capacity. Additionally, drop tests on composite beams with corrugated webs highlight their energy absorption characteristics under impact loads, revealing that shorter beams exhibit instability. Further investigations into A parametric study also examined the influence of web openings, showing that their presence can alter ultimate strength by up to 15%. These findings contribute to optimizing the design of crane runway beams by identifying key parameters affecting load capacity, energy absorption [1–5].

In this study, shell elements were used to model the crane runway beam with a triangular corrugated web. The selection of shell elements is justified by their ability to accurately capture both in-plane and out-of-plane deformations while maintaining computational efficiency. The corrugated web was discretized using four-node shell elements with six degrees of freedom per node, allowing for realistic simulation of bending, shear, and axial deformations.

The finite element analysis was conducted using LIRA-CAD 2022, employing a nonlinear static analysis approach. The nonlinear performance was considered to account for geometric imperfections and material nonlinearity. The boundary conditions were applied to represent a simply supported beam, with constraints imposed to prevent rigid body motion while allowing for realistic structural deformations under applied loads.

Mesh convergence analysis was performed to ensure accuracy, where different mesh densities were tested, and the final mesh size was selected based on the balance between computational efficiency and solution accuracy. The numerical results were validated against experimental data, demonstrating good agreement with a maximum deviation of 2.9% in displacement values.

Corrugated web beams are widely studied for their enhanced shear resistance and structural efficiency. This

research aims to determine optimal parameters for triangular corrugated webs in crane runway beams by analyzing their mechanical behavior under various loading conditions. Finite element (FE) simulations and experimental tests confirm that corrugation improves shear buckling resistance, influences stress distribution, and affects structural stability. Studies on castellated-corrugated beams highlight reduced load capacities due to combined web post-buckling and flange buckling effects. Additionally, the connection method between crane rails and runway beams significantly impacts local stress distribution. Further analysis of cold-formed built-up beams with corrugated webs reveals that web thickness, shear panel properties, and connection types influence flexural rigidity and bending capacity. FE modeling of trapezoidal corrugated webs also demonstrates distinct torsional performance compared to conventional I-beams. These findings contribute to optimizing crane runway beam design for improved shear resistance and structural performance. [6–10].

Crane runway beams are subjected to complex loading conditions, including lateral-torsional buckling, and geometric imperfections, which can lead to structural failures over time. Studies indicate that factors such as rail-beam connection detailing, and stress concentrations significantly impact the durability and safety of these structures. Furthermore, non-destructive testing methods and numerical simulations provide valuable insights into crack formation and stress distribution, enabling more effective maintenance strategies. The 2021 study by Kovacevic et al. highlights the importance of optimizing design parameters, improving load distribution, and implementing advanced monitoring techniques to enhance the service life and structural reliability of crane runway beams [11–17].

The structural performance of crane runway beams is influenced by various factors, including shear lag effects, lateral torsional buckling, and the impact of crane rails on bending stiffness and load-bearing capacity. Recent research highlights the importance of numerical simulations and finite element analysis in evaluating the stress distribution, deformation, and stability of crane runway girders. Strengthening techniques, such as welding additional steel members to increase load-bearing capacity, have also been explored to enhance the structural integrity of runway beams. These studies provide a foundation for optimizing crane runway design, ensuring safety and long-term durability under varying operational conditions [18–25].

A corrugated beam consists of flanges made from various metal sections and a transversely corrugated (curved) web. The web may feature different corrugation profiles, such as triangular, sinusoidal, trapezoidal, and rectangular shapes. The flanges of such beams are fabricated from steel profiles or shaped sections, or welded sheets. Corrugated web beams have seen widespread adoption in many countries due to their enhanced performance.

In recent years, crane runway beams have gained significant attention owing to the growing construction of industrial buildings. Their reliability, strength, and efficiency contribute to improved production and logistics processes while ensuring safety under heavy load operations. Crane runway beams, as load-bearing elements, transfer loads from crane wheels and provide structural stability by distributing longitudinal and lateral forces, including seismic effects, to connected columns.

Several studies, including those by Wei et al. [26] and Progress in Steel Building Structures [27], have addressed the design of crane runway beams with corrugated webs.

The material used in the study complies with GOST 380-2005 [29], which minimizes the variability of properties within a single steel grade. The mechanical characteristics were applied in accordance with the test report (Appendix A).

Despite prior research on corrugated-web beams, gaps remain regarding the optimal design parameters, including web thickness, corrugation height, and angle. The present study addresses these gaps by systematically analyzing the impact of corrugation geometry on the structural performance of crane runway beams, with a focus on replacing flat webs and stiffeners with corrugated webs to enhance strength and reduce labor-intensive manufacturing processes [30].

Additionally, issues related to crane runway beams, such as weld cracking and damage to fastening joints, highlight the need for further investigation. The study aims to provide practical recommendations for the design and application of corrugated-web beams in industrial settings, ensuring improved safety, reduced material usage, and enhanced structural efficiency.

METHODS AND MATERIALS

2.1. Methods

This research focuses on the feasibility of replacing flat webs with corrugated ones to improve the physical, mechanical, and economic properties of crane runway beams. The selected design is justified by the absence of detailed specifications regarding the thickness, length, depth, and corrugation radius of welded I-section crane runway beams in scientific literature and regulatory documents across the Commonwealth of Independent States (CIS).

In Kazakhstan, triangular corrugations are predominantly used for constructing beams with transversely corrugated webs [28]. Beams with trapezoidal and rectangular corrugations are commonly used in Sweden, Finland, the United States, Japan, and the Netherlands, while sinusoidal corrugations are employed in Austria, Ukraine, Poland, and Russia.

The methodology includes numerical analysis of crane runway beams with flat and corrugated webs to evaluate their load-bearing capacity, stability, effective parameters, and to improve economic efficiency and reduce labor intensity. The experimental investigation was conducted on a simply supported beam with a triangular corrugated web.

Due to the absence of precise calculation methods for crane runway beams with corrugated webs, physical testing is essential for practical application in construction. The geometric parameters, materials, loads, and boundary conditions used in the experiment are detailed below.

When specifying the dimensions of the corrugation, the following notation is used: a b×c / d, where a is the corrugation length (mm), b is the corrugation depth (mm), c is the web thickness (mm), and d is the corrugation bend radius (mm).

As a result of theoretical and experimental studies conducted in 2019 [28] at the KazGASA laboratory, effective geometric parameters for a 2 mm thick web were identified. Tests were carried out on a large-scale model (scale 1:1) of a corrugated beam with constant cross-section (flange 150×6 mm, web 600×2 mm, corrugation parameters 280×45×2/30 mm) and a span of 4200 mm in Figure 1.

The load magnitude during beam testing was measured using an electronic dynamometer and confirmed by a manometer.

Deflections were recorded using electronic deflectometers (accuracy 0.01 mm), and the influence of model displacement due to compliance was accounted for and eliminated. Deflectometers measured vertical displacements at load application points and supports. The design load Fp for the tested beams was set at 60 kN. Loading was applied in increments: 10 kN for the first two steps and 5 kN for subsequent steps. Prior to the experiment, a test loading was conducted up to 35 kN with an increment of 5 kN. Due to relatively small deflections, this load step was selected. After each step, a holding period was observed, and deflectometer readings were recorded.

The tests were conducted using a single-span scheme with concentrated load applied at mid-span (Figure 2) and hinged support conditions. The boundary conditions were applied to both ends of the beam model at the nodes of the end plate surface by limiting the required degrees of freedom. The beam at the left part has a fastening along the axes X, Y and Z and at the right part along the axes Y and Z.

The general view of the beam and its geometric dimensions are shown in Figure 2.

The triangular corrugations of the web, with rounded peaks, had a wavelength of L_c = 280 mm and a wave height of h_r = 45 mm. The material selected for the web and flanges was 3SP steel according to GOST 380-2005 [29] corresponding to grade S245 , with the following



Fig. 1. Tested geometry

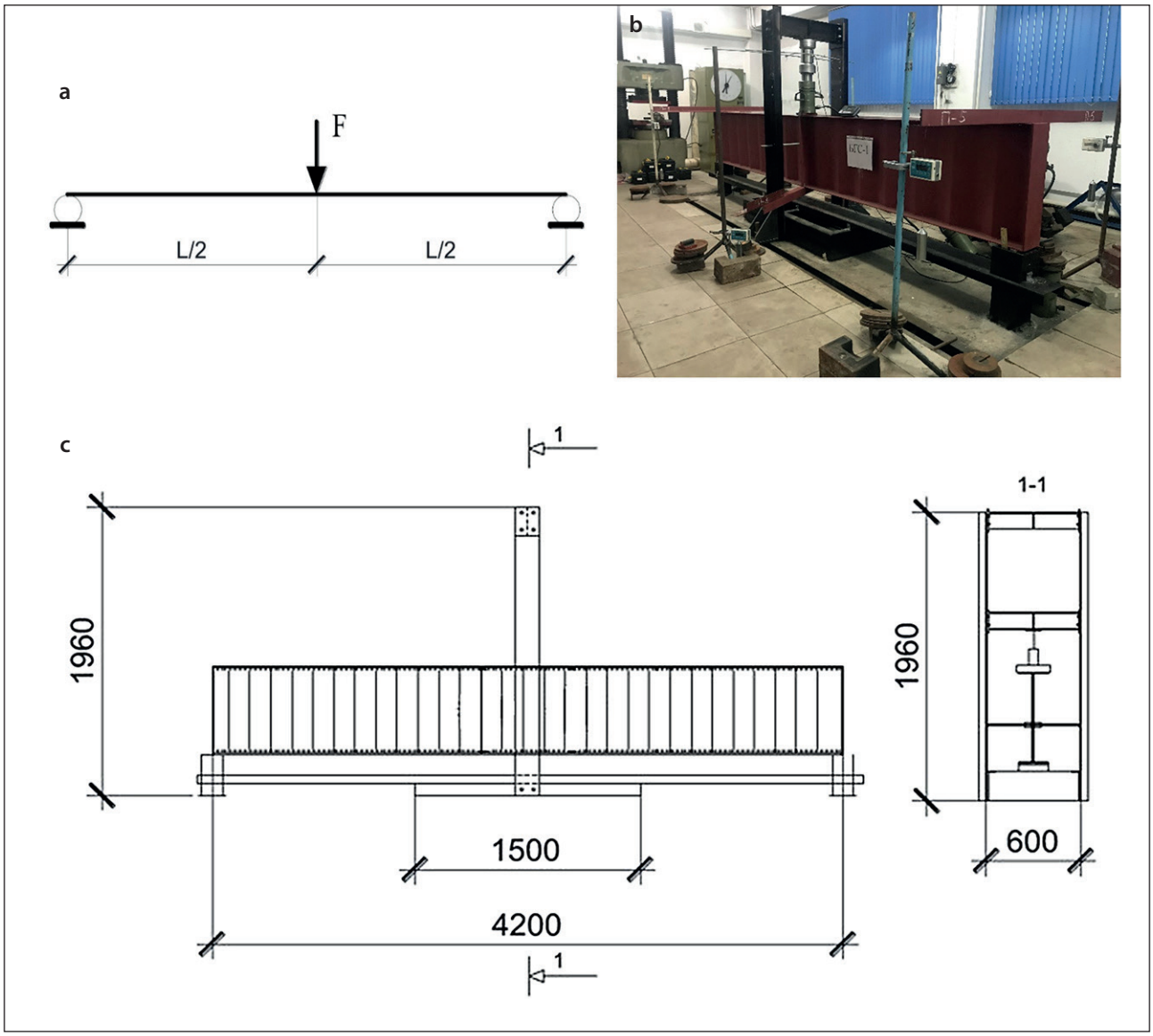


Fig. 2. Loading Scheme, and Test Stand of the Corrugated Beam: a – Loading Scheme of the Tested Model; b – Test Stand for Full-Scale Experiments; c – Experimental setup

characteristics: yield strength σ_y = 245 N/mm² and tensile strength σ_u = 370 N/mm². The actual yield strength was σ_y = 339.7 N/mm², and the tensile strength was σ_u = 435.4 N/mm²[28]. The beams were manufactured at the production facility of Yusem Tau LLP in Almaty, Kazakhstan. The general view of the corrugated beam is shown in Figure 2.

The beams were loaded using hydraulic jack DG-25 hydraulic jacks through a steel plate measuring 100×20 mm and with a length equal to the flange width (L = 150 mm). The loading schemes are presented in Figure 2.

The deformation properties of the beams were examined alongside the analysis of the stress state of the elements, as limited information is available on the deformation behavior of thin-walled corrugated webs, which is of particular interest for construction practice.

The use of the finite element method (FEM) in the Lira-Computer-aided design (LI-RA-CAD) 2022 software for numerical modeling of crane runway beams with corrugated webs was justified by its proven efficiency in solving structural mechanics problems. FEM accurately accounts for the complex geometry of corrugations, the heterogeneity of the stress-strain state, and allows for validation of results by comparing them with experimental data, as was successfully done using the test results (Table 1).

To validate the finite element method (FEM) calculations, we employed a large-scale model (scale 1:1), which allowed us to closely approximate the computa-

Table 1. Experiment Results

Maximum Load $F_{e,max,}$ kN	Bending Moment at Mid-Span M_e, kNm	Shear Force at Supports Q_e, kN	Deflection (mm) Y_t	Y_e, mm	Failure Characteristics of the Specimens
150	157.5	75	8.04	13.28	Local Buckling of the Flange

tional conditions to real-world scenarios. As a result, the discrepancy between experimental and theoretical data was found to be negligible.

The Figure 3 demonstrates the correlation between displacement and force for both experimental and numerical (LIRA) results, showing a similar trend in both cases. The numerical model closely approximates the experimental values, with minor discrepancies. At lower loads, differences are minimal, but as the force increases, the gap widens. At 150 kN, the experimental displacement is 13.28 mm, while LIRA predicts 12.90 mm, a 2.9% difference. This deviation is likely due to boundary condition imperfections and unaccounted residual stresses. Despite this, the LIRA model provides an accurate structural response assessment, with deviations remaining within an acceptable range.

In LIRA-CAD, the finite element method (FEM) is used to analyze the structural performance of crane runway beams. The beam is discretized into finite elements, and for each element, a specific type of finite element is employed to capture its structural response accurately. The software utilizes a numerical solution approach, where the element stiffness matrix defines the relationship between nodal forces and displacements. The analysis type employed in this study includes nonlinear analysis, ensuring an accurate representation of the beam's performance under load. After solving the system of equations, the nodal displacements are obtained, followed by the internal forces that characterize the structural response.

Despite the robustness of the numerical modeling approach using LIRA-CAD, challenges could arise regarding the accurate definition of boundary conditions, particularly in the areas of welded joints and supports, optimization of the finite element mesh to capture the complex corrugation geometry, and potential nonlinear

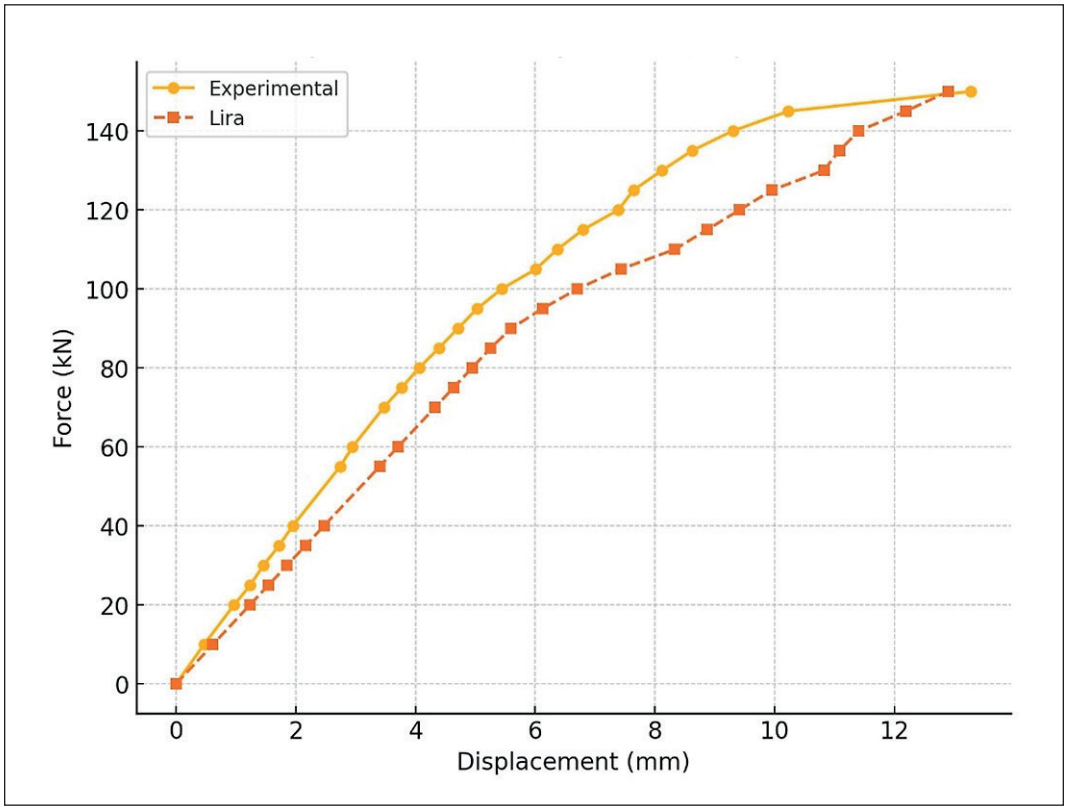


Fig. 3. Comparison of Flange Displacements in the Beam Between Physical and Computer Experiment

effects under high loads. These issues required careful verification and validation of the results.

Three load magnitudes and three sizes of crane runway beams were selected, and their deformations and stresses were analyzed. Each structure was subjected to corresponding static loads from the overhead crane wheels. The experimental investigation was carried out on a simply supported beam with a triangular corrugated web.

Experimental studies of corrugated beams are a crucial part of validating various hypotheses regarding the principles of operation and the efficiency of design solutions. Both Kazakhstani and international construction codes lack specific requirements for the thickness, length, depth, and curvature radius of corrugations.

The conducted tests enabled a comparative analysis of the deformation properties of beams with identical cross-sections under similar operating conditions and allowed verification of the computer simulation data. The results obtained from the LIRA-CAD 2022 simulations confirmed the program's suitability for further numerical studies of corrugated I-beams.

The numerical model was validated using FEM by comparing its results with experimental data from Bryantsev's study (Figure 4), confirming its accuracy and reliability. Subsequently, optimal dimensions for the corrugated web were determined, and effective parameters were identified.

Table 1 presents the results of the experimental data, including key mechanical parameters measured during the study. The table summarizes the maximum load ($F_{e,max}$) in kN, the bending moment at mid-span (M_e) in kNm, the shear force at the supports (Q_e) in kN, and the deflection values (Y_t and Y_e) in mm. The recorded values are as follows: a maximum load of 150 kN, a bending moment of 157.5 kNm, and a shear force of 75 kN. The deflection at measurement points is reported as 8.04 mm and 13.28 mm, respectively. These results provide insights into the structural performance of the tested specimens under applied loads.

Computer modeling of the beams was performed using the LIRA-CAD finite element analysis software. Boundary conditions were applied to both ends of the beam model at the nodes of the end plate surface by restricting the necessary degrees of freedom. The beam was fixed along the Y and Z axes at both ends. The material used for the web and flanges was S245 steel according to GOST 380-2005 [28]. The yield strength is σ_y = 339.7 N/mm². Since the unit of measurement in LIRA-CAD 2022 is t/m², it is converted to 34,639.76 t/m². The elastic modulus is E = 206,000 MPa, and Poisson's ratio is ν = 0.3. The ultimate relative strain under compression and tension was taken as 0.025 (2.5%). Nonlinear deformation of structures is considered in the calculation (Figure 5).

The Table 2 presents the key results of experimental testing conducted on crane runway beams. The parameters listed include the maximum applied load $F_{e,max}$ in kN, the corresponding bending moment at mid-span M_e in kNm, and the shear force at the supports Q_e in kN. Additionally, the table provides the deflection values at mid-span: theoretical deflection Y_t and experimental deflection Y_e, both measured in millimeters. The data highlights the discrepancy between theoretical and experimental deflections, which is critical for validating numerical models and improving the accuracy of future design calculations.

The difference between meshes № 3 and 4 is 0.78%, therefore the calculations were continued with №3 and a plate size of 5×5 mm.

According to the results of computer modeling, the difference in beam deflections between the physical experiment (13.28 mm) and the computer experiment (12.9 mm) is 2.9%. The discrepancy is attributed to inaccuracies in the beam installation within the test stand and the inability to fully account for all parameters in the calculation.

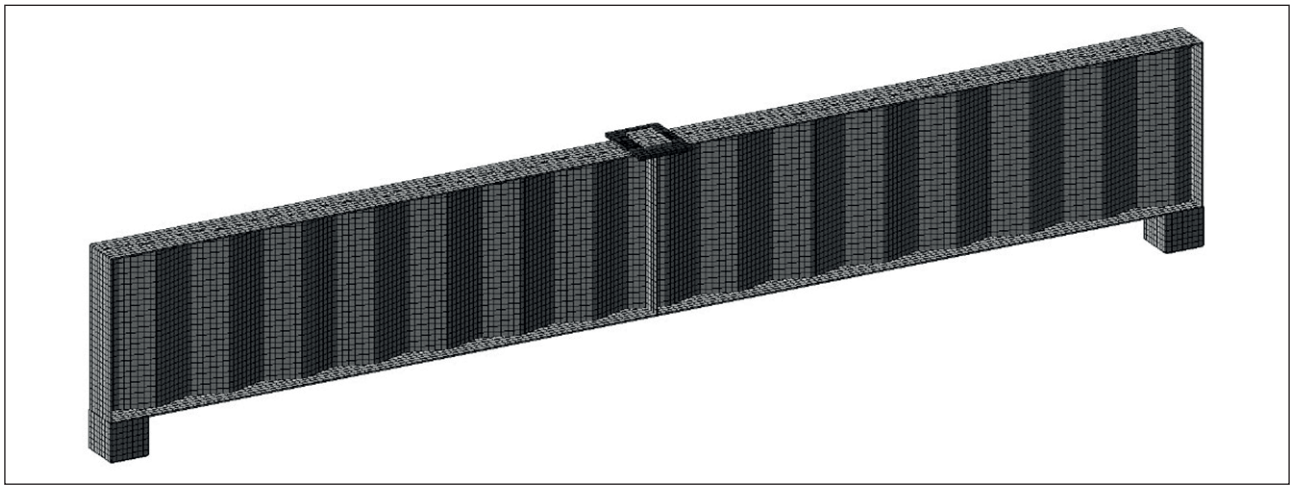


Fig. 4. Model of the Beam

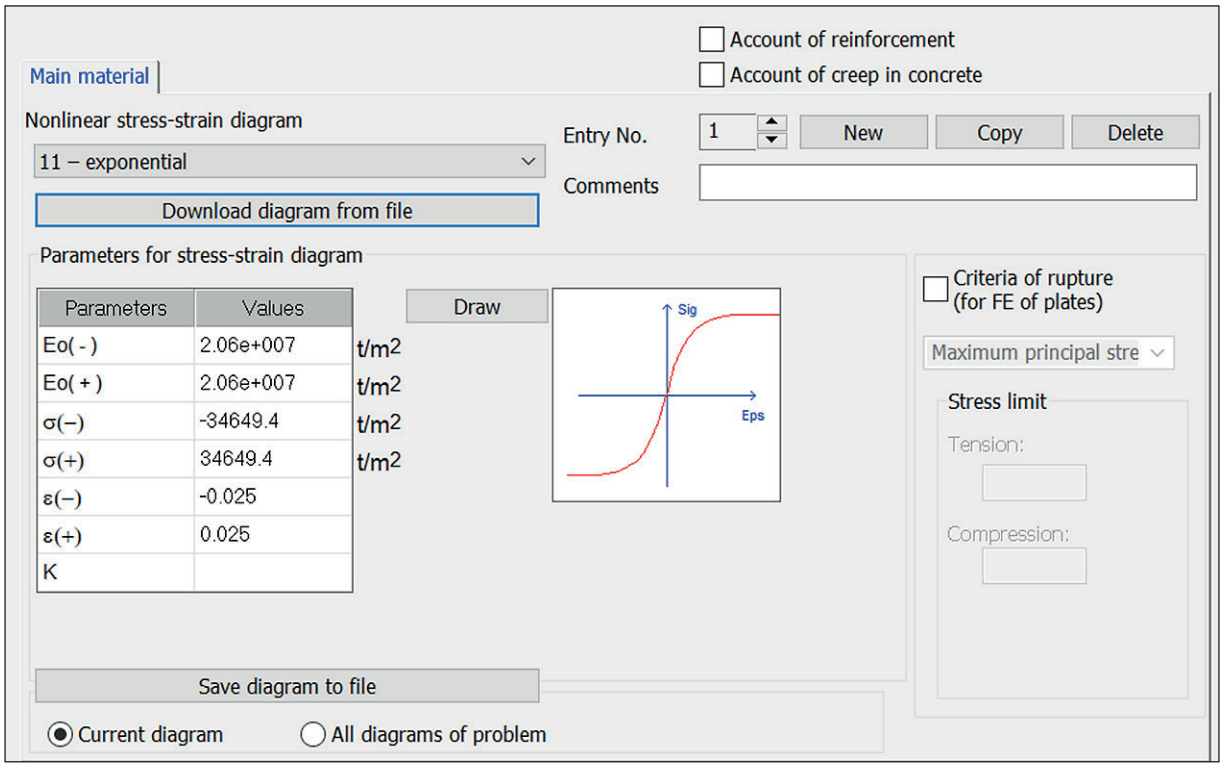


Fig. 5. Setting the Parameters for Nonlinear Material Deformation

Table 2. Results of Experimental Data

Maximum Load $F_{e,max}$, kN	Bending Moment at Mid-Span M_e, kNm	Shear Force at Supports Q_e, kN	Deflection (mm) Y_t	Y_e
150	157.5	75	8.04	13.28

Table 3. Mesh Independence Study

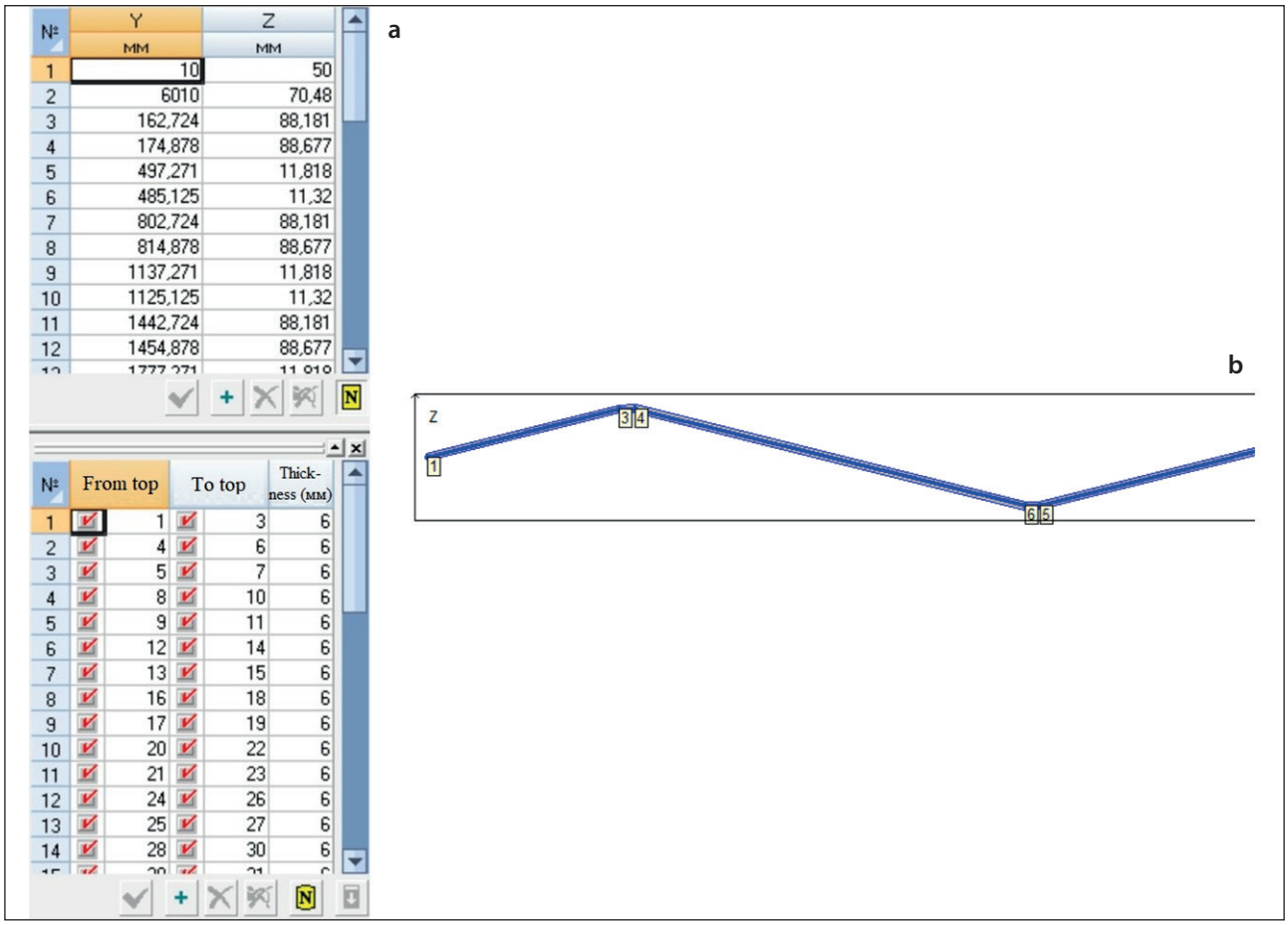
Mesh №	i_x, pcs	i_y, pcs	ε, mm	%
1	211	8	10,1	-
2	421	16	13,6	34,65
3	841	31	12,9	5,1
4	1681	61	12,8	0,78

The dimensional characteristics of the beam with a flat web were taken from the series of crane runway beams issued by the Central Research Institute for Steel Structures (TsNIIproektstalkonstruktsiya), Almaty, in 1982 [31].

Subsequently, models of crane runway beams with corrugated webs were developed, and numerical analyses were performed. The results were compared and described, taking into account all geometric features [32].

These coordinates, shown in Figure 6, were then input into the post-processor of the Structure Computer-aided design (SCAD) Tonus computational suite to determine the geometric characteristics. The Tonus software is designed for the generation of cross-sections and the calculation of their geometric characteristics based on the theory of thin-walled members.

Previous research (Maximov et al., 2016) has demonstrated that the implementation of a corrugated web in beams significantly enhances their strength and stability. A steel savings of up to 20% can be achieved by utilizing a thinner web. Theoretical and experimental studies conducted by A.A. Bryantsev in 2019 at the KazGASA laboratory identified optimal geometric parameters for



№	Y, мм	Z, мм
1	10	50
2	6010	70,48
3	162,724	88,181
4	174,878	88,677
5	497,271	11,818
6	485,125	11,32
7	802,724	88,181
8	814,878	88,677
9	1137,271	11,818
10	1125,125	11,32
11	1442,724	88,181
12	1454,878	88,677

№	From top	To top	Thickness (мм)
1	1	3	6
2	4	6	6
3	5	7	6
4	8	10	6
5	9	11	6
6	12	14	6
7	13	15	6
8	16	18	6
9	17	19	6
10	20	22	6
11	21	23	6
12	24	26	6
13	25	27	6
14	28	30	6

Fig. 6. Assignment of coordinates for the corrugated web 640×80×6/30 in the SCAD Tonus postprocessor: a – Coordinates; b – General view

corrugated webs with thicknesses of 6, 8 and 10 mm. The most efficient configuration is a web with a corrugation length of 480 mm and a corrugation depth of 80 mm [29].

In current study, the results differ due to the specific loading conditions and operational characteristics of crane girders. One plain web girder and eleven triangular corrugated web girders with varying profiles were selected for comparison. The reference object for comparative analysis is a girder with a plain web, illustrated in Figure 4. The dimensional characteristics of the plain web girder are presented in Table 4 [31].

The Figure 7 illustrates the geometric dimensions of a crane girder with a plain web. The web height (h_w) is 640 mm, and its thickness (t_w) is 6 mm. The upper flange has a width (b_f^1) of 250 mm and a thickness (t_f^1) of 10 mm, while the lower flange has a width (b_f^2) of 6000 mm and a thickness (t_f^2) of 10 mm. The total height of the girder (h) is 660 mm. These dimensions serve as a reference for comparative analysis with corrugated web girders in structural performance evaluation.

The coordinates of the extreme points of the corrugated web were also determined, as shown in Figure 8.

The crane girder is subjected to the load from the weight of the overhead crane. Cranes with lifting capacities of 12.5, 32, and 50/12.5 tons were selected. The corresponding wheel loads were taken as 0.95 kN, 2.25 kN, and 3.35 kN, respectively, in accordance with GOST 25711-83 [33]. The calculation considers the weight of the crane-supporting structures, the maximum force exerted by the crane wheel, and the sum of ordinate forces.

The load is applied from two crane wheels with a step equal to the crane base width B (Figure 9). For light cranes, there are two wheels on one side. The crane base for a lifting capacity of 10 tons is 4.4 m, for 30 tons is 5.1 m, and for 50 tons is 5.6 m.

Figure 10 below illustrates the application of a concentrated load of 0.95 kN from the crane wheel, without eccentricity. The analysis was performed using LIRA-CAD 2022.

The Figure 10 presents the numerical models of crane girders analyzed in the LIRA-CAD software. Model (a) represents Crane beam with a flat web, while model (b) represents Crane beam with a corrugated web. These

Table 4. Comparative Dimensional characteristics of the plain web

h_w – web height	t_w – web thickness	b_f^1 – upper flange width	t_f^1 – upper flange thickness	b_f^2 – lower flange width	t_f^2 – lower flange thickness	h – total girder height
640	6	250	10	200	10	660
840	8	250	10	200	10	860
990	10	320	12	200	10	1012

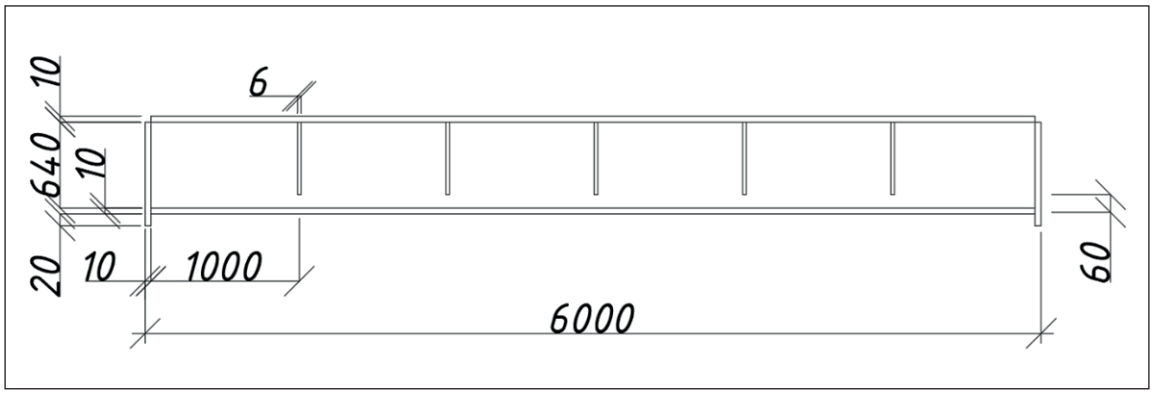


Fig. 7. Dimensions of the crane girder with a flat web

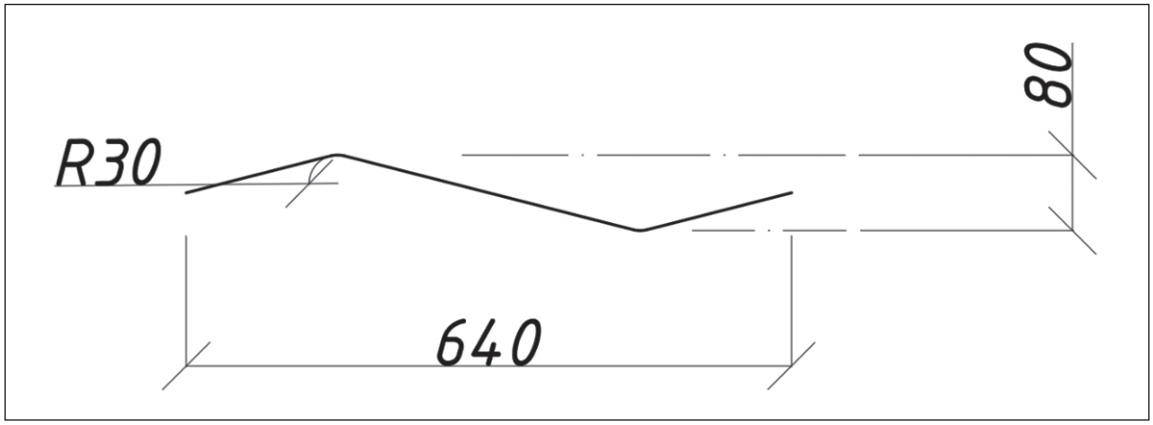


Fig. 8. Dimensions of the corrugated web 640×80×6/30

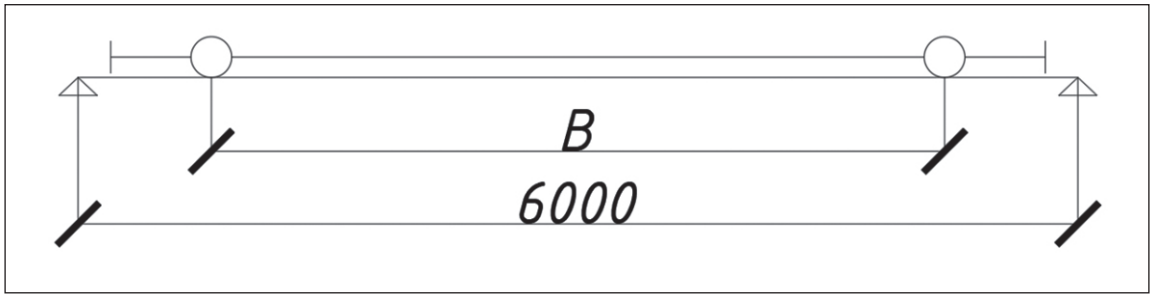


Fig. 9. Load application scheme for the crane runway beam

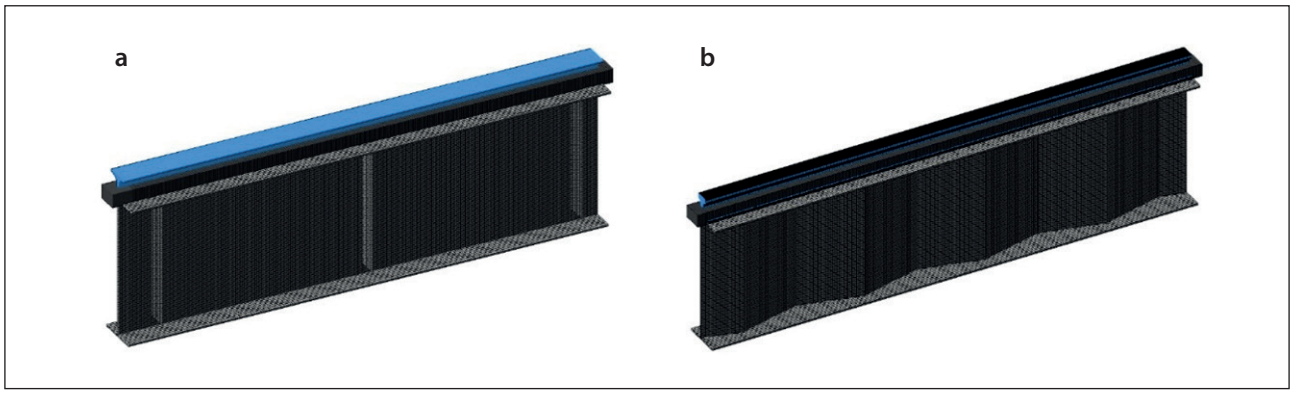


Fig. 10. Beam models in the LIRA-CAD software, where: a – Crane girder with a flat web; b – Crane girder with a corrugated web

models were developed to compare the structural performance of both configurations under crane wheel loads, evaluating parameters such as stress distribution, deformations, and load-bearing capacity.

Cost Efficiency. The cost estimation of crane runway beam fabrication was carried out, considering differences in the manufacturing process.

Input Data:

1. Steel grade: S245.
2. Steel cost: € 1.5/kg.
3. Labor costs:

Assembly and welding of components: € 0.8/kg.

Additional welding of stiffeners (only for the flat-web beam): € 0.4/kg.

4. Beam mass:

Flat-web beam: 440.7 kg.

Corrugated-web beam: 419.3 kg.

The difference in labor intensity lies in the manufacturing process of the beams. The flat-web beam requires three operations, including assembly, welding, and the additional welding of stiffeners. In contrast, the corrugated-web beam involves only two operations, assembly and welding, as stiffeners are not required. The applicable standards governing the materials and production processes include EN 10025-2, which defines requirements for hot-rolled structural steel, including the S245 grade. Additionally, EN 1090-2 specifies the execution of steel structures, outlining the requirements for assembly and welding, while EN 1993-1-1 (Eurocode 3) establishes the design principles for steel structures.

RESULTS AND DISCUSSION

The study evaluates the structural performance of crane girders with flat and corrugated webs under various loading conditions. By integrating numerical simulations and experimental testing, the analysis focuses on stress distribution, deformation performance, and load-bearing capacity. The following results highlight the advantages of corrugated-web girders in terms of mechanical efficiency and material optimization.

To further quantify these advantages, a detailed comparison between flat and corrugated web configurations is necessary. This comparison helps identify the impact of different web designs on the structural efficiency of crane runway beams.

The reduced moments of inertia and reduced moments of resistance will be compared, as a parameter was selected that remains consistent across all established corrugation shapes. This approach allows for a comprehensive evaluation of both the overall stability and the load-bearing capacity of the web.

Figure 11, 12, 13 illustrates the variation in the equivalent moment of inertia and equivalent section modulus relative to the central axis Y1 for different crane girder web types, highlighting the structural efficiency improvements achieved with corrugated web configurations compared to a flat web.

The reduced moment of inertia is calculated using the following formula:

$$\mathrm{Ieq} = \frac{1000 \cdot I}{\rho \cdot A}, \quad (1)$$

where:

I_{eq} is the equivalent moment of inertia, cm⁴/kg,

I is the moment of inertia, cm⁴,

ρ is the density of steel, g/cm³,

A is the cross-sectional area, cm².

The reduced section modulus is calculated using the following formula:

$$\mathrm{Weq} = \frac{1000 \cdot W}{\rho \cdot A}, \quad (2)$$

where:

W_{eq} is the equivalent section modulus, cm³/kg,

W is the section modulus, cm³,

ρ is the density of steel, g/cm³,

A is the cross-sectional area, cm².

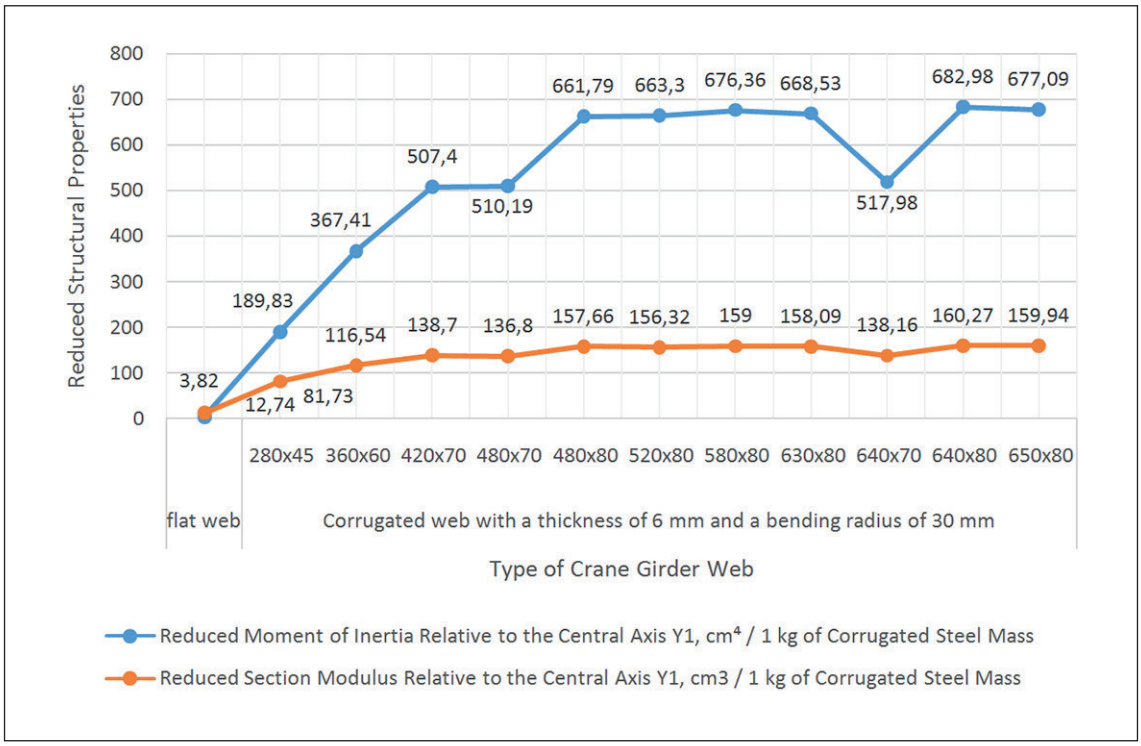


Fig. 11. Equivalent Structural Properties of Crane Girder Webs with a Thickness of 6 mm and a Bending Radius of 30 mm

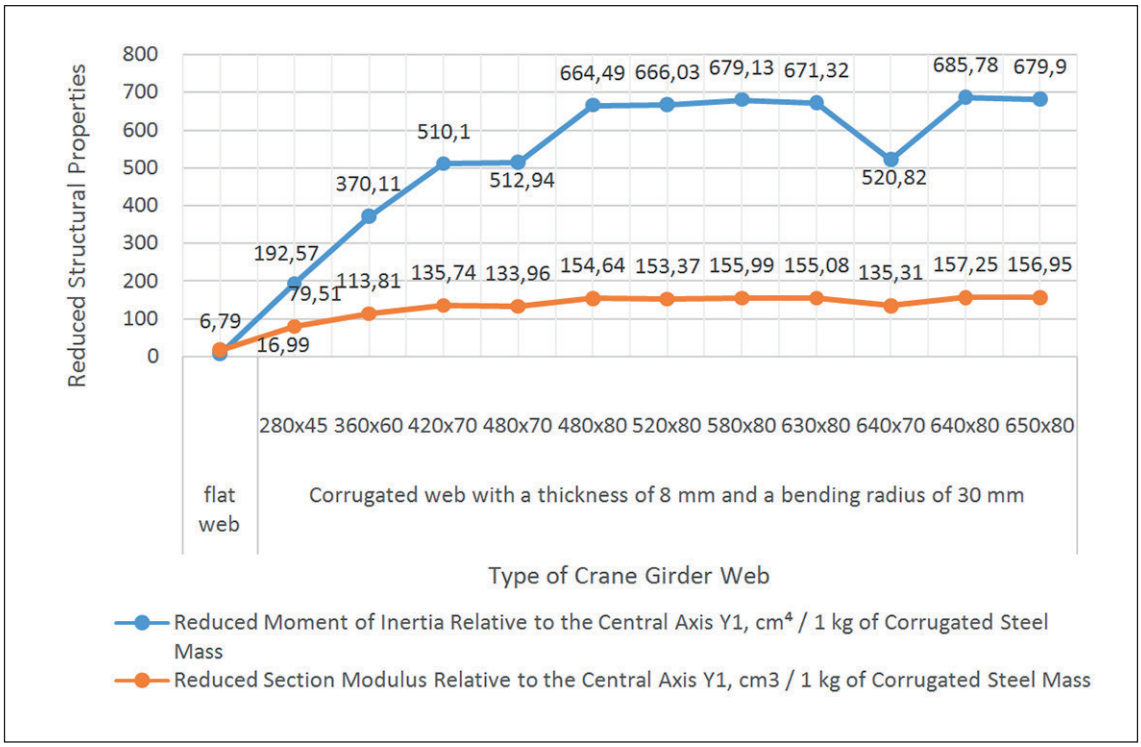


Fig. 12. Equivalent Structural Properties of Crane Girder Webs with a Thickness of 8 mm and a Bending Radius of 30 mm

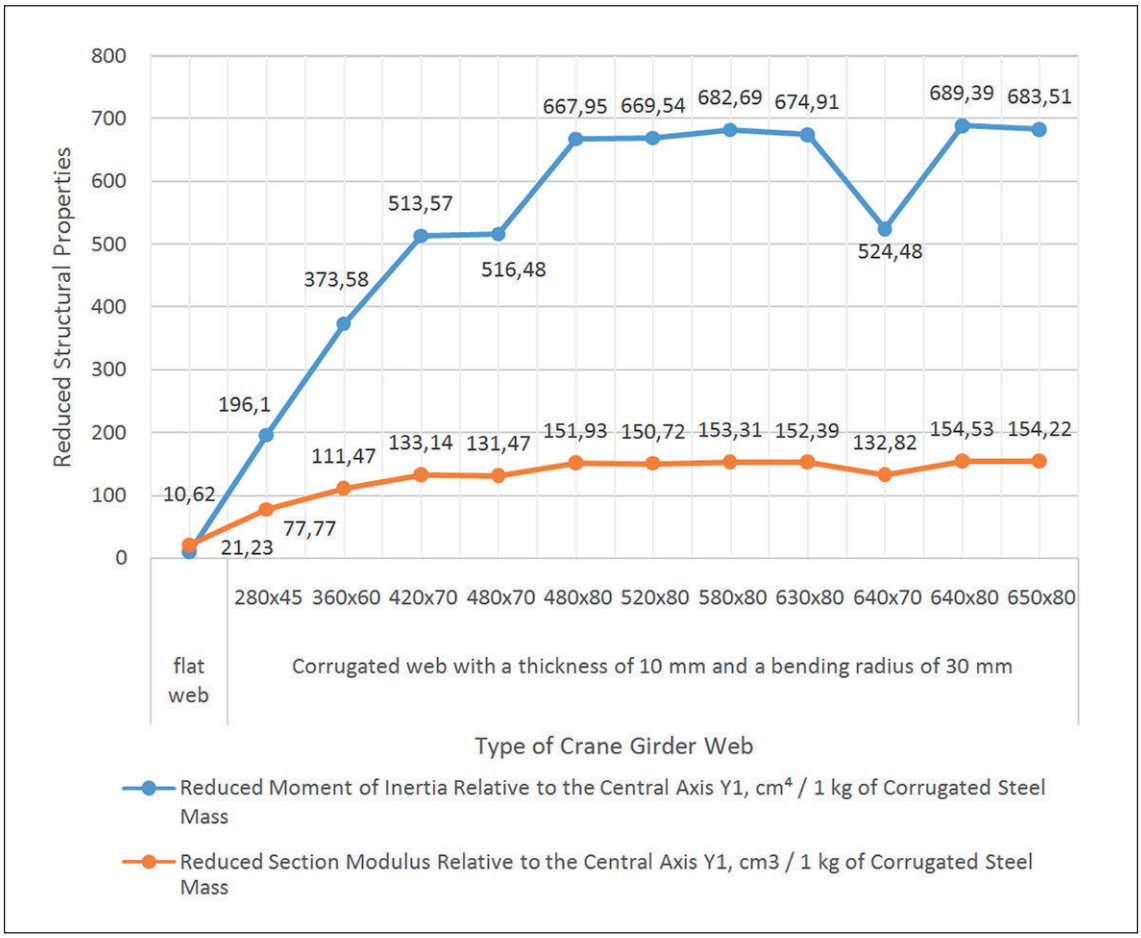


Fig. 13. Equivalent Structural Properties of Crane Girder Webs with a Thickness of 10 mm and a Bending Radius of 30 mm

The Figures 11, 12, 13 illustrate the variation in the equivalent moment of inertia and the equivalent section modulus relative to the central axis Y1 per unit mass of corrugated steel for crane girder webs with different thicknesses (6, 8 and 10 mm).

Taking into account that the flange thickness has a greater impact on the moment of inertia than the web thickness, and that the thickness is uniform in all variants except for the upper flange of the beam with a 10 mm web thickness (where the flange thickness is 12 mm), across all three thicknesses, the equivalent moment of inertia shows a clear increasing trend with the web size, reaching peak values at 640×80 for the 6 mm, 8 mm and 10 mm webs. The highest equivalent moment of inertia is observed in the 10 mm thick web, peaking at 689.39 cm^4/kg. In contrast, the lowest values are seen for the flat web across all cases, with the minimum recorded for the 6 mm web at 3.82 cm^4/kg.

The equivalent section modulus follows a similar pattern but with smaller variations. The highest values are observed in the 10 mm web at 154.53 cm^3/kg, while the lowest occur in the 6 mm web at 12.74 cm^3/kg.

Overall, increasing the web thickness enhances both moment of inertia and section modulus, indicating better structural performance. However, the efficiency gain diminishes for larger web sizes, suggesting an optimal range for thickness selection in crane girder designs.

The data presents a comparative analysis of various corrugated web configurations for metal structures with a standard thickness of 6 mm, 8 mm, 10 mm. The parameters of cross-sectional area, equivalent flat web thickness, and steel consumption provide insight into how modifications in corrugation characteristics influence structural performance. As the corrugation length increases, a positive trend is observed, with improvements in the equivalent section modulus and moment of inertia. Additionally, increasing the corrugation depth enhances these properties, indicating improved load-bearing capacity. The most optimal results are recorded for the 640×80 configuration, where the highest values are achieved.

The Figure 14 illustrates the stress characteristics of crane girder webs under different wheel loads. As the load increases from 0.95 kN to 2.25 kN, all stress values become more negative, indicating higher stress levels.

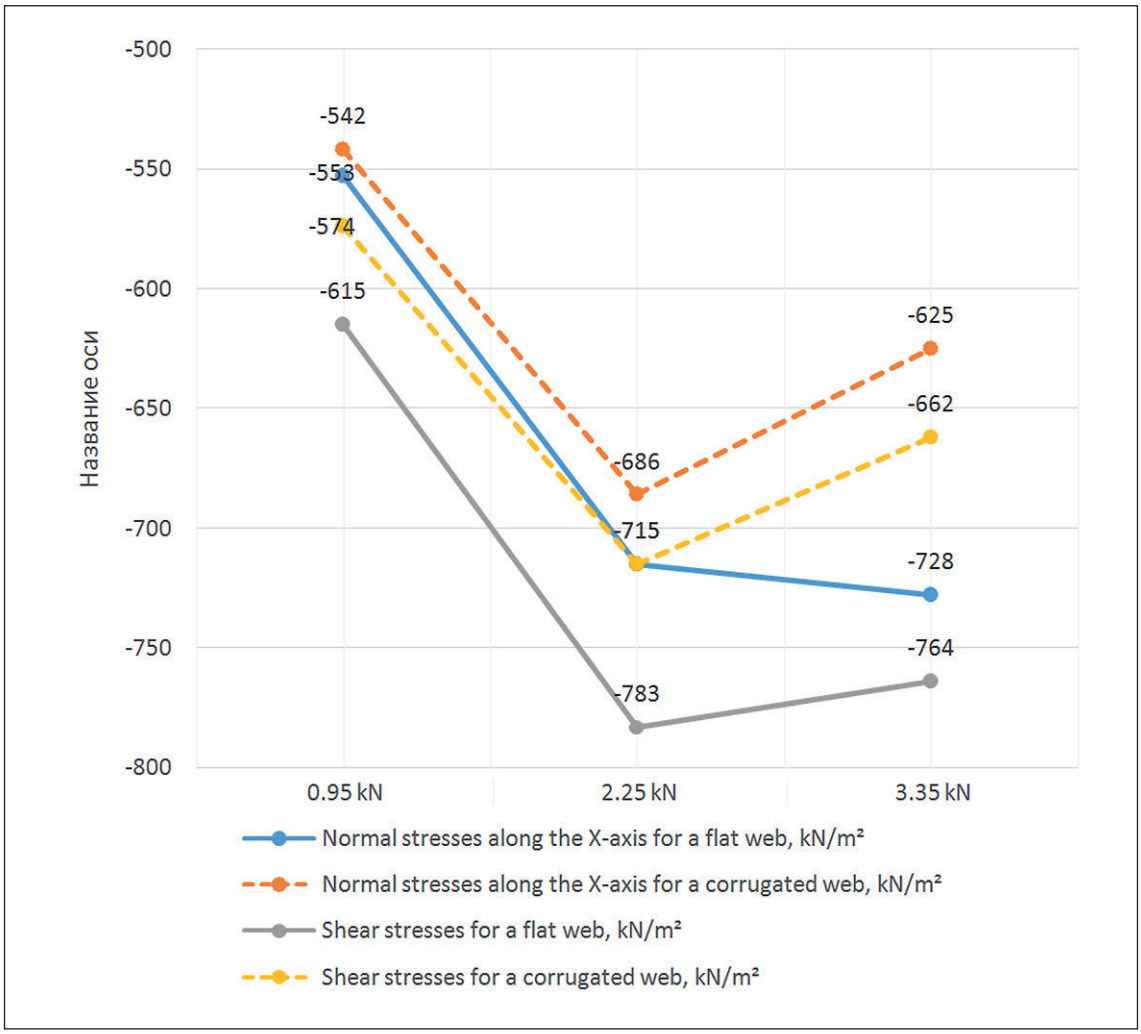


Fig. 14. Stress distribution in crane girder webs under different wheel loads

The shear stress for a flat web reaches the most negative value at −783 kN/m² under a 2.25 kN load, representing the maximum shear stress recorded. Conversely, the normal stresses along the X-axis for a corrugated web demonstrate the least negative values, with a minimum of −542 kN/m² at 0.95 kN and -625 kN/m² at 3.35 kN, indicating lower stress levels compared to the flat web. The shear stresses for both flat and corrugated webs show an increasing trend after 2.25 kN, suggesting a redistribution of forces at higher loads. These findings highlight that flat webs experience higher stresses than corrugated webs, reinforcing the structural efficiency of corrugated designs in reducing both normal and shear stresses.

The Figure 15 demonstrates the shear force distribution for flat and corrugated web crane beams under increasing loads. The maximum shear force along the X-axis in the flange is observed for the flat web at 10.5 kN/m under 3.35 kN of load, while the corrugated web reaches 10 kN/m under the same load. At 0.95 kN, the shear force along the X-axis is significantly lower, with values of 5.5 kN/m for the flat web and 5 kN/m for the corrugated web. For the shear force along the Y-axis in the flange, the flat web reaches a peak of 8.5 kN/m at 3.35 kN, while the corrugated web records 6kNt/m under the same conditions. At the lowest load of 0.95 kN, shear forces remain minimal, with values of 2.5 kN/m for the flat web and 2. kN/m for the corrugated web.

The trend indicates that shear forces increase proportionally with applied load, with flat web configurations generally experiencing higher shear stresses than their corrugated counterparts. However, the corrugated web shows a more uniform stress distribution, reducing the peak values compared to the flat web.

The displacements of the flanges along the X-axis are consistently lower for the corrugated web compared to the flat web, indicating improved structural stability under increasing crane wheel pressure, as shown in Figure 16.

The Figure 16 illustrates the displacements of the flanges along the X-axis for both flat and corrugated web configurations under increasing pressure from a single

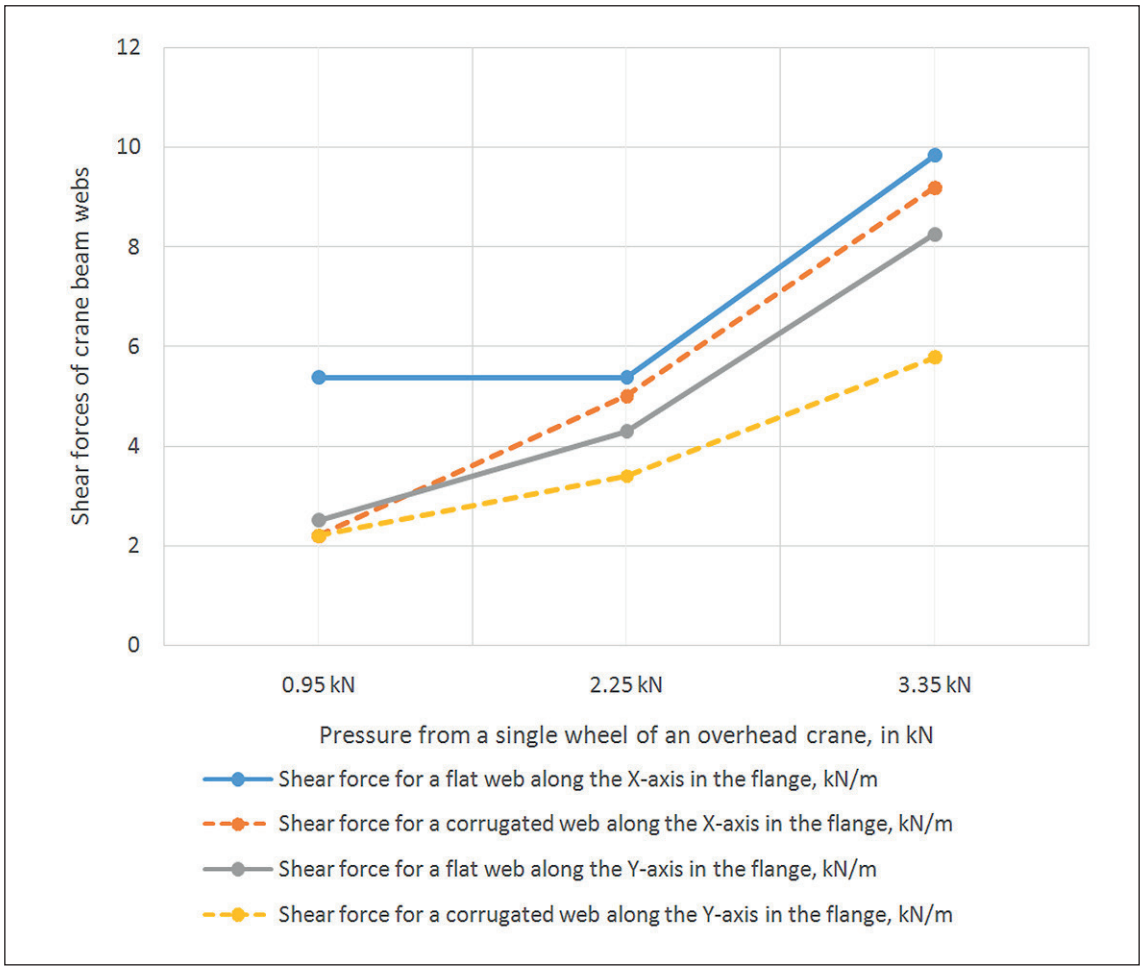


Fig. 15. This is a figure. Schemes follow the same formatting

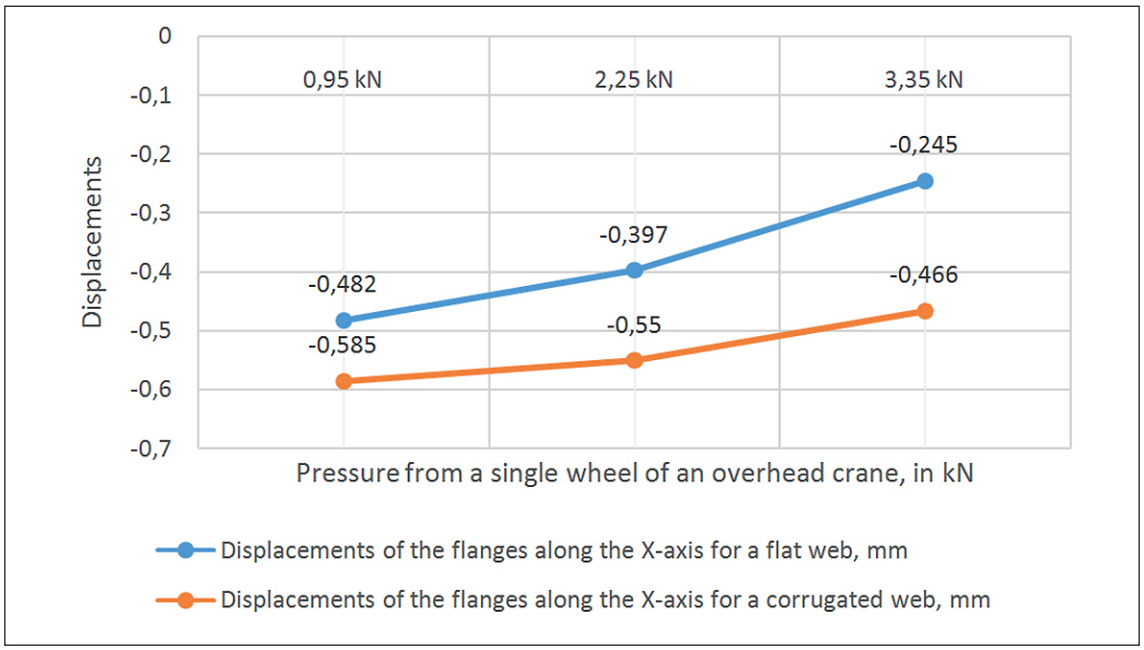


Fig. 16. Flange Displacements Along the X-Axis Under Different Load Conditions

Table 5. Cost comparison

Beam Type	Total Mass (kg)	Material Cost (€)	Welding Cost (€)	Total Cost (€)
Flat-Web Beam	440.7	661.05	528.84	1137.70
Corrugated-Web Beam	419.3	628.95	335.44	940.20

wheel of an overhead crane. Although the displacement values for the corrugated web are consistently greater than those for the flat web, both remain within acceptable limits.

All three graphs consistently demonstrate the advantages of the corrugated web over the flat web in terms of structural performance. The graphs illustrate the differences in the stress-strain characteristics of flat and corrugated web crane girders. In the flat web (represented by the blue and gray lines), stresses are higher than in the corrugated web (orange and yellow lines), indicating a greater susceptibility of the flat web to both normal and shear stresses. The corrugated web, in turn, distributes loads more efficiently, reducing localized stress concentrations.

In terms of shear forces, the flat web (solid lines) experiences higher transverse forces than the corrugated web (dashed lines) along both the X and Y axes. This suggests that the flat web is more susceptible to transverse forces, whereas the corrugated web redistributes loads, minimizing shear force concentration.

Additionally, the deflection magnitude in the flat web (blue line) is higher than in the corrugated web (yellow line), indicating that the corrugated web exhibits greater stiffness, thereby reducing vertical deformations in the structure.

Since the connection of the flanges to the web is performed using automatic welding, the influence of residual welding stresses was not analyzed separately in this study and was not included in the computational model. The primary focus was placed on the general stress-strain states of the structure under static loading. It is assumed that the effect of welding-induced stresses may have a localized nature, which does not significantly impact the overall structural strength within the adopted assumptions.

Overall, the corrugated web demonstrates superior performance by reducing stresses, transverse forces, compared to the flat web, highlighting its structural efficiency.

Economic Analysis

A comparative cost analysis was conducted for both flat-web and corrugated-web crane runway beams. The analysis takes into account material costs, welding and assembly costs, and the final total cost of manufacturing each type of beam.

For the flat-web beam, the material cost is calculated as 661.05 €, based on a total weight of 440.7 kg and a steel price of 1.5 €/kg. The manufacturing process involves three operations: assembly and welding of elements, as well as welding of stiffeners. The cost for assembly and welding is 352.56 €, while the additional cost for welding stiffeners is 176.28 €. Consequently, the total welding cost amounts to 528.84 €, leading to a final total cost of 1137.70 €.

In contrast, the corrugated-web beam requires fewer operations, as no stiffeners need to be welded. The material cost is slightly lower at 628.95 €, due to a reduced total weight of 419.3 kg. The welding and assembly cost is calculated at 335.44 €, resulting in a final total cost of 940.20 €.

The comparative results demonstrate that the corrugated-web beam is a more cost-effective option due to lower material consumption and the elimination of stiffener welding, reducing both labor intensity and overall manufacturing costs in Table 5.

CONCLUSION

The finite element method (FEM) in LIRA-CAD 2022 has proven effective for modeling crane runway beams with corrugated webs, accurately accounting for complex geometry and stress-strain heterogeneity. The comparison between experimental and numerical results (Figure 3) demonstrates a close correlation, with deviations remaining within an acceptable range. At 150 kN, the experimental displacement was 13.28 mm, while the LIRA model predicted 12.80 mm, showing a 2.9% difference due to boundary condition imperfections and unaccounted residual stresses. Despite minor discrepancies, the numerical model provides a reliable assessment of structural performance.

The results of this study highlight the structural advantages of corrugated web crane girders over their flat web counterparts. The findings confirm that the corrugated web provides better load distribution, reduces stress concentrations, and improves overall stiffness, which aligns with previous research on the mechanical efficiency of corrugated steel structures.

In terms of stress characteristics, the corrugated web consistently exhibited lower normal and shear stresses compared to the flat web, as demonstrated by the graphical data. This reduction in stress values suggests that the

corrugation enhances the web's ability to redistribute loads, minimizing localized stress peaks and potential structural weaknesses. These findings are consistent with earlier studies on the mechanical performance of corrugated plates, which indicate improved resistance to buckling and increased durability under cyclic loading conditions.

The analysis of shear forces further supports the structural efficiency of the corrugated web. The flat web showed higher transverse forces along both the X and Y axes, indicating a higher susceptibility to shear deformations. Conversely, the corrugated web exhibited a more uniform force distribution, which can contribute to longer service life and reduced maintenance needs.

Regarding vertical displacements, the results demonstrate that the corrugated web exhibits significantly lower deflections than the flat web. The increased stiffness observed in the corrugated web suggests improved stability under varying load conditions, a key factor in ensuring the long-term reliability of crane girders. This outcome aligns with numerical simulations and experimental studies on the deformation behavior of corrugated steel beams, where optimized wave geometries effectively enhance rigidity without excessive material consumption.

Despite the evident advantages of the corrugated web, further investigations are necessary to refine design methodologies and optimize geometric parameters for specific applications. Future research should focus on parametric studies analyzing different corrugation shapes, angles, and thicknesses, as well as experimental validation under dynamic loading conditions.

Overall, the study confirms that the use of corrugated webs in crane girders leads to significant improvements in stress distribution, shear force reduction, and deflection control. These results contribute to the broader understanding of corrugated steel applications in structural engineering and support the continued development of innovative, high-performance design solutions.

The obtained conclusions are specific to the investigated triangular corrugation profile and cannot be directly extrapolated to other corrugation geometries. Significant differences in the shape and configuration of corrugations, such as trapezoidal, sinusoidal, or rectangular profiles, result in variations in structural behavior, load distribution, and stress concentration. Therefore, additional studies are required to assess the applicability of these findings to alternative corrugation profiles.

In future studies, additional analysis should be conducted to account for potential residual stresses from welding in order to assess their impact on the structural performance and compare the results with existing experimental and regulatory data.

REFERENCES

1. Li J., Yu J., Li Y. Drop Tests and Numerical Simulation of Composite Beams with Corrugated Web. *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics* 2023: 55. https://doi.org/10.16356/j.1005-2615.2023.01.006

2. Al-Mawashee, H.S. Al-Kannoon, M.A.A. Flexural Strength of Castellated Beams with Corrugated Webs. In Proceedings of the Journal of Physics: *Conference Series*. 2021; 1973.

3. Lukačević I., Ungureanu V., Numerical Parametric Study on Corrugated Web Built-up Beams with Pinned End Supports. *In Proceedings of the Cold-Formed Steel Research Consortium Colloquium*; 2022.

4. Kováč M., Ároch R. Influence of Imperfections in the Design of Crane Runway I-Beams. *Conference papers*. 2023; 6. https://doi.org/10.1002/cepa.2302

5. Euler M., Kuhlmann U., Fatigue Verification of Crane Runway Beams According to Eurocode 3. *Stahlbau*. 2019;88. https://doi.org/10.1002/STAB.201900093

6. Agüero A., Baláž I., Koleková Y., Moroczová L. New Interaction Formula for the Plastic Resistance of I- and H-Sections under Combinations of Bending Moments My, Ed, Mz, Ed and Bimoment BEd. *Structures*. 2021;29. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.059

7. Dürr A., Dreiling A., Bartenbach J. Existing Crane Runway Girders and Crane Runway Supporting Structures: Assessing & Evaluation, Damage Profiles and Further Operation. *Stahlbau*. 2019; 88. https://doi.org/10.1002/STAB.201900091

8. Ellifritt D.S., Lue D.M. Design of Crane Runway Beam with Channel Cap. *Engineering Journal*. 1998; 35. https://doi.org/10.62913/engj.v35i2.699

9. Dakov D., Belev B. Durability Issues Related to Detailing Links of Steel Crane Runway Beams to Columns. In Proceedings of the IABSE Congress. Christchurch 2020: *Resilient Technologies for Sustainable Infrastructure – Proceedings 2020.*

10. Seeßelberg C. On the Economic Design of Rolled Section Runway Beams for Top Mounted Overhead Cranes. *Stahlbau*. 2002;71. https://doi.org/10.1002/stab.200202190

11. Kossakowski P., Wciślik W., Bakalarz M. Failure of the Overhead Crane Runway. *MATEC Web of Conferences*. 2019;284. https://doi.org/10.1051/matecconf/201928409001

12. Citarelli S., Feldmann M. Fatigue Failure of Runway Beams Due to Wheel Loads. *ce/papers* 2019; 3. https://doi.org/10.1002/cepa.1110

13. Caglayan O., Ozakgul K., Tezer O., Uzgider E. Fatigue Life Prediction of Existing Crane Runway Girders. *J Constr Steel Res*. 2010;66. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.009

14. Keilpflug F., Kamenzky R., Alarcón D.J., Mallareddy T.T., Blaschke P. Structural Health Monitoring on Industrial Structures Using a Combined Numerical and Experimental Approach. *In Proceedings of the Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. 2020.

15. Mudenda K., Kabani M. A Proposed Approach for Obtaining the Shear Centre and Monosymmetry Constant for an I-Section Beam with a Welded Channel Cap. *International Journal of Steel Structures*. 2020;20. https://doi.org/10.1007/s13296-020-00411-8

16. Kornilova A.V., Safina L.K. On the Issue of the Admissibility of Defects in the Lower Chord of Crane Beams. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennost.i* 2023; 2023. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-6-23-28

17. Kovacevic S., Markovic N., Ceranic A. Bendic, M. Unfavorable Imperfection Shapes in Steel Plate Girders for Web Local Crippling. In Proceedings of the *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*. 2021.

18. Kirill, N. Nikolay, L. Igor, G. Crane Runway Beams: Endurance Test. 2017.

19. Bessimbayev Y.T., Niyetbay S.E., Awwad T., Kuldeyev E.I., Uderbayev S.S., Zhumadilova Z.O., Zhambakina Z.M. The Creation of Geotechnical Seismic Isolation from Materials with Damping Properties for the Protection of Architectural Monuments. *Buildings*. 2024;14:1572. https://doi.org/10.3390/buildings14061572i

20. Moga, C. Drăgan, D. Nerișanu, R. Effects of Shear Lag in Steel Box Girders of a Crane Runway. Ovidius University Annals of Constanta - Series Civil Engineering 2020; 22. https://doi.org/10.2478/ouacsce-2020-0003

21. Citarelli S., Feldmann M. Derivation of a New Fatigue Class for Top Flange to Web Junctions of Runway Beams. *In Proceedings of the Procedia Structural Integrity*. 2010;19.

22. Kraus M., Mämpel S., Crisan A. Influence of Rails on the Stability of Crane *Runway Girders. ce/papers*. 2017; 1. https://doi.org/10.1002/cepa.143

23. Sitthipong S., Meengam C., Chainarong S., Towatana P. Design Analysis of Overhead Crane for Maintenance Workshop. *In Proceedings of the MATEC Web of Conferences*. 2018; 207.

24. Movaghati S. Strengthening Beam Sections of Industrial Buildings against Lateral Torsional Buckling. *In Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Stability Conference*. 2019; 2.

25. Özkılıç Y.O., Bozkurt M.B. Numerical Validation on Novel Replaceable Reduced Beam Section Connections for Moment-Resisting Frames. *Structures* 2023; 50. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.027

26. Wei G.Q., Dong H.T., Li Y., Fan Q. Mechanical Performance of Crane's Main Girders with Corrugated Webs. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2015; 286. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44674-4_23

27. Kettler, M. Unterweger, H. Ebner, D. Lokale Spannungen in Kranbahnträgern Mit Längssteifen: Experimentelle Und Numerische Untersuchungen. *Stahlbau* 2021: 90. https://doi.org/10.1002/stab.202000069

28. Bryantsev A.A., Absimetov V.E., Lalin V. V. The Effect of Perforations on the Deformability of Welded Beam with Corrugated Webs. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 87. https://doi.org/10.18720/MCE.87.2

29. GOST 380-2005. Carbon steel ordinary quality. 2005. Available online: https://meganorm.ru/Data2/1/4293837/4293837742.pdf (accessed on 9 Decembet 2005).

30. Bryantsev A., Absimetov V., Laboratory Tests of Welded Corrugated Beams with Perforations. *In Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020; 70.

31. Melnikov N., Kuznetsov V., Bakhtutskiy V., Shuvalov L., Sorokina I., Assortment from Series 1.426.2-3 Steel crane beams. TsNIIProektstalkonstruktsiya 1982; 1.

32. GOST 25711-83 Electric overhead crane's general purpose with loading capacity from 5 to 50 tons Available online: Available online: https://meganorm.ru/Data2/1/4293837/4293837742.pdf (accessed on 12 April 1983).

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dias A. Okanov – PhD doctoral student, Assistant professor of the Faculty of General Construction, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, di.okanov@mok.kz. https://orcid.org/0000-0001-9645-3140

Aleksandr A. Bryantsev – PhD, Faculty of General Construction, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, a.briantcev@mok.kz. https://orcid.org/0000-0002-6932-8202

Mehmet B. Bozkurt – PhD, Department of Civil Engineering, Manisa Celal Bayar University, Şehit Prof. Dr. İlhan Varank Campus, Yunusemre/Manisa, Turkey, mehmet.bozkurt@cbu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-1213-3092

Sayat E. Niyetbay – PhD, Department of Industrial and Civil Engineering, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, s.nietbay@mok.kz, https://orcid.org/0000-0002-9748-6830

Zhangazy N. Moldamuratov – PhD, Research Professor at the Faculty of General Construction, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, Associate professor at the Higher School of Advanced Digital Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, zhanga_m_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4573-1179

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Dias A. Okanov – writing an article scientific editing of the text identification of dependencies conducting the experimental part of the study.

Aleksandr A. Bryantsev – scientific guidance research concept development of methodology scientific text editing final conclusions.

Mehmet B. Bozkurt – preparation of samples writing an article processing of experimental data accumulation of material.

Sayat E. Niyetbay – conducting a literary review conducting the experimental part of the study.

Zhangazy N. Moldamuratov – conducting a literary review conducting the experimental part of the study.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 08.04.2025; accepted for publication 12.04.2025.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Научная статья / Original article
УДК 536.1
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-132-150

CC BY 4.0

Определение эффективных параметров треугольной гофрированной стенки подкрановых балок

Диас Алматович Оканов[1], **Александр Александрович Брянцев**[1], **Мехмет Бакир Бозкурт**[2], **Саят Ержанулы Ниетбай**[1, 3*], **Жангазы Нуржанович Молдамуратов**[1, 4*]

[1] Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан
[2] Университет Маниса Джелал Баяр, кампус имени шахида проф. д-ра Илхана Варанка, Юнусемре/Маниса, Турция
[3] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
[4] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — изучить поведение подкрановых балок с треугольными гофрированными стенками, которые находят все более широкое применение в промышленном строительстве благодаря повышенной устойчивости к сдвигу и конструктивной эффективности. Плоские стенки имеют ряд недостатков — высокие напряжения и большой расход. Оптимизация геометрии гофров позволяет повысить прочность и снизить себестоимость конструкции. **Методы и материалы.** Работа основана на численном моделировании методом конечных элементов (МКЭ) в программе LIRA-CAD 2022 и полномасштабных экспериментальных испытаниях. Была исследована работа балок с гофрированной и плоской стенкой при нагрузках от кранов грузоподъемностью 10, 30 и 50 тонн. Оценивались деформации и распределение напряжений и сдвига. **Результаты и обсуждение.** Расчетная модель продемонстрировала высокую точность (максимальное отклонение от эксперимента – 2,9%). Подкрановые балки с гофрированной стенкой показали меньшие касательные и нормальные напряжения, меньшие прогибы и более равномерное распределение усилий. Также они оказались более экономичными за счет меньшего расхода. **Заключение.** Гофрированные балки с треугольным профилем превосходят балки с плоской стенкой как по прочностным, так и по экономическим характеристикам. Исследование подтверждает целесообразность применения гофрированных стенок в проектировании подкрановых балок для повышения несущей способности и оптимизации затрат.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подкрановая балка, плоская стенка, гофрированная стенка, статическая нагрузка, мостовой кран, поперечная сила, нормальные напряжения, касательные напряжения, экономический анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Оканов Д.А., Брянцев А.А., Бозкурт М.Б., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н. Определение эффективных параметров треугольной гофрированной стенки подкрановых балок. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):132–150. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-132-150. – EDN: YIYSOF.

Determination of the effective parameters of a triangular corrugated web for crane runway beams

Dias A. Okanov[1], **Aleksandr A. Bryantsev**[1], **Mehmet B. Bozkurt**[2], **Sayat E. Niyetbay**[1, 3*], **Zhangazy N. Moldamuratov**[1, 4*]

[1] International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan
[2] Manisa Celal Bayar University, Şehit Prof. Dr. İlhan Varank Campus, Yunusemre/Manisa, Turkey
[3] Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[4] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

* Corresponding author: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

© Оканов Д.А., Брянцев А.А., Бозкурт М.Б., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н., 2025

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to investigate the performance of crane runway beams with triangular corrugated webs. These beams are increasingly popular in industrial construction because of to their enhanced shear resistance and structural efficiency. Flat webs have several disadvantages, including high stress levels and excessive material consumption. Optimizing the geometry of corrugations makes it possible to improve strength and reduce the overall construction cost. **Methods and Materials.** The study is based on numerical modeling using the finite element method (FEM) in LIRA-CAD 2022 software and full-scale experimental testing. The performance of beams with both corrugated and flat webs was analyzed under wheel loads from cranes with lifting capacities of 10, 30, and 50 tons. Deformations and the distribution of normal and shear stresses were evaluated. **Results and Discussion.** The numerical model demonstrated high accuracy, with a maximum deviation of only 2.9% from experimental results. Crane runway beams with corrugated webs exhibited lower shear and normal stresses, reduced deflections, and more uniform force distribution. They also proved to be more economical due to lower material consumption and reduced labor intensity. Additionally, the corrugated beams showed enhanced economic performance, reducing material costs. **Conclusion.** Triangular corrugated web beams outperform traditional flat web beams in structural and economic terms. The findings support the use of optimized corrugation profiles to increase load-bearing capacity and reduce production costs. These results are relevant for optimizing crane beam design in industrial structures.

KEYWORDS: crane runway beam, flat web, corrugated web, static load, overhead crane, shear force, normal stresses, shear stresses, cost analysis

FOR CITATION:
Okanov D.A., Bryantsev A.A., Niyetbay S.E., Bozkurt M.B., Moldamuratov Zh.N. Determination of the effective parameters of a triangular corrugated web for crane runway beams. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):132–150. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-132-150. – EDN: YIYSOF.

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель данного исследования – изучение поведения и деформативности сварных подкрановых балок с треугольными гофрированными стенками. Для решения этой задачи необходимо достичь нескольких ключевых целей: определить оптимальную конфигурацию стенки для трех типов подкрановых балок при трех вариантах нагрузок (0,95 кН на колесо для крана грузоподъемностью 10 т, 2,25 кН на колесо для крана 30 т и 3,35 кН на колесо для крана 50 т); выявить наиболее эффективные параметры гофра; провести сравнение экономической эффективности балок с плоскими и гофрированными стенками.

Гофрированные двутавровые балки привлекли внимание в строительной инженерии благодаря их способности повышать устойчивость к сдвигу при сохранении общей эффективности конструкции. В данном исследовании анализируется влияние гофрированной стенки на изгибную и сдвиговую жесткость подкрановых балок посредством численного моделирования и экспериментальной валидации. Используя программный комплекс Lira-CAD, были разработаны модели конечных элементов для изучения балок с различными условиями опирания и типами нагрузок. Полученные результаты показали, что гофрированные стенки не оказывают значительного влияния на изгибную жесткость, но существенно повышают устойчивость к сдвиговым нагрузкам. Экспериментальные испытания также выявили, что балки с гофрированной стенкой обладают высокой способностью к поглощению энергии при ударных нагрузках, однако укороченные образцы демонстрируют признаки нестабильности. Параметрическое исследование влияния отверстий в стенке показало, что они могут снижать предельную нагрузку до 15%. Эти результаты вносят вклад в оптимизацию конструкции подкрановых балок путем выявления ключевых факторов, влияющих на их несущую способность и энергоемкость[1–5].

В данном исследовании моделирование балки с треугольной гофрированной стенкой выполнено с использованием оболочечных элементов, что позволяет точно учитывать как плоские, так и внеплоскостные деформации при оптимальном вычислительном ресурсе. Гофрированная стенка была дискретизирована четырехузловыми оболочечными элементами с шестью степенями свободы в каждом узле, что обеспечивает реалистичное моделирование изгиба, сдвига и осевых деформаций.

Конечный элементный анализ выполнен в программном комплексе LIRA-CAD 2022 с использованием нелинейного статического расчета, учитывающего геометрические и материальные нелинейности. Граничные условия моделировали балку на шарнирных опорах, предотвращая ее перемещение как жесткого тела, но позволяя быть конструктивным деформациям под воздействием нагрузки.

Для повышения точности расчетов была проведена сходимость расчетной сетки: анализировались разные уровни дискретизации, и окончательный размер сетки выбран исходя из баланса между вы-

числительной эффективностью и точностью решения. Численные результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, и максимальное расхождение по перемещениям составило 2,9%, что свидетельствует о высокой достоверности численного моделирования.

Гофрированные балки широко изучаются из-за их повышенной устойчивости к сдвигу и высокой конструктивной эффективности. Настоящее исследование направлено на определение оптимальных параметров треугольных гофрированных стенок подкрановых балок путем анализа их механического поведения при различных нагрузках. Численное моделирование и экспериментальные испытания подтвердили, что гофра увеличивает устойчивость к сдвигу, перераспределяет напряжения и улучшает стабильность конструкции. Исследования балок с комбинированными стенками показали снижение несущей способности из-за сочетания эффектов последующего выпучивания стенки и выпучивания полки. Также отмечено, что метод соединения рельсов с подкрановыми балками оказывает значительное влияние на локальное распределение напряжений. Дополнительный анализ тонкостенных балок с гофрированными стенками выявил, что толщина стенки, параметры сдвиговой панели и тип соединения влияют на изгибную жесткость и несущую способность. Моделирование трапециевидных гофрированных стенок показало отличия в крутильной жесткости по сравнению с традиционными двутавровыми балками. Эти выводы способствуют оптимизации конструкции подкрановых балок с учетом сопротивления сдвигу и общей конструктивной эффективности [6–10].

Подкрановые балки подвержены сложным условиям нагружения, включая боковую крутильную неустойчивость и геометрические несовершенства, что может привести к разрушению конструкции со временем. Исследования показали, что детализация соединений рельсов с балками и концентрация напряжений значительно влияют на долговечность и надежность этих конструкций. Кроме того, методы неразрушающего контроля и численное моделирование позволяют выявлять механизмы образования трещин и распределение напряжений, что способствует разработке более эффективных стратегий технического обслуживания. Исследование Ковачевича и соавторов (2021) подчеркнуло важность оптимизации параметров конструкции, улучшения распределения нагрузки и внедрения передовых технологий мониторинга для повышения срока службы и надежности подкрановых балок.

Конструктивные характеристики подкрановых балок зависят от различных факторов, включая эффекты сдвигового запаздывания, боковую крутильную неустойчивость и влияние рельсов на изгибную жесткость и несущую способность. Современные исследования подчеркивают важность численного моделирования и конечного элементного анализа для оценки распределения напряжений, деформаций и устойчивости подкрановых балок. Различные методы усиления, такие как приварка дополнительных стальных элементов, также изучались для увеличения их несущей способности. Эти исследования формируют основу для оптимизации конструкции подкрановых балок, обеспечивая их безопасность и долговечность в условиях переменных нагрузок.

Гофрированная балка состоит из полок, изготовленных из различных металлических профилей, и поперечно-гофрированной (изогнутой) стенки. Геометрия гофра может варьироваться от треугольного до синусоидального, трапециевидного и прямоугольного очертания. Полки таких балок изготавливаются из прокатных профилей, сварных элементов или формованных секций. Подкрановые балки с гофрированными стенками получили широкое распространение благодаря их улучшенным эксплуатационным характеристикам.

В последние годы подкрановые балки привлекли значительное внимание в связи с ростом строительства промышленных зданий. Их надежность, прочность и эффективность способствуют повышению производительности и логистики, обеспечивая безопасность при работе с тяжелыми нагрузками. Как несущие элементы, подкрановые балки передают нагрузки от колес мостового крана и обеспечивают структурную устойчивость, распределяя продольные и поперечные усилия, включая сейсмические воздействия, на соединенные колонны.

Ряд исследований, включая работы Вэй и соавторов [26] и публикации Progress in Steel Building Structures [27], посвящены проектированию подкрановых балок с гофрированными стенками.

Примененный в исследовании материал соответствует стандарту GOST 380-2005 [29], что минимизирует вариативность свойств стали в пределах одной марки. Механические характеристики учитывались в соответствии с протоколом испытаний (Приложение А).

Несмотря на предыдущие исследования, остается ряд нерешенных вопросов, касающихся оптимальных параметров конструкции, таких как толщина стенки, высота гофра и угол наклона. Настоящая работа направлена на восполнение этих пробелов путем системного анализа влияния геометрии гофра на конструктивные характеристики подкрановых балок. Особое внимание уделено замене плоских стенок с ребрами жесткости на гофрированные стенки, что позволяет повысить прочность конструкции и снизить трудоемкость изготовления.

Кроме того, проблемы, связанные с подкрановыми балками, такие как образование трещин в сварных швах и повреждение узлов крепления, требуют дальнейшего изучения. Данное исследование направлено на разработку практических рекомендаций по проектированию и применению гофрированных стенок в промышленных сооружениях, что обеспечит повышение безопасности, снижение расхода материалов и повышение конструктивной эффективности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы

Данное исследование посвящено оценке возможности замены плоских стенок на гофрированные для повышения физических, механических и экономических характеристик подкрановых балок. Выбор данной конструкции обусловлен отсутствием подробных спецификаций относительно толщины, длины, глубины и радиуса гофра сварных двутавровых подкрановых балок в научной литературе и нормативных документах стран Содружества Независимых Государств (СНГ).

В Казахстане для строительства балок с поперечно-гофрированной стенкой преимущественно используются треугольные гофры [28]. Балки с трапециевидными и прямоугольными гофрами распространены в Швеции, Финляндии, США, Японии и Нидерландах, а балки с синусоидальными гофрами применяются в Австрии, Украине, Польше и России.

Методология исследования включает численный анализ работы подкрановых балок с плоской и гофрированной стенкой для оценки их несущей способности, устойчивости, эффективных параметров, а также повышения экономичности и снижения трудоемкости конструкции. Экспериментальное исследование выполнено на двухопорной балке с треугольной гофрированной стенкой.

Ввиду отсутствия точных методов расчета подкрановых балок с гофрированной стенкой физические испытания являются необходимыми для практического применения в строительстве. Геометрические параметры, материалы, нагрузки и граничные условия, принятые в эксперименте, подробно изложены ниже.

При обозначении размеров гофра используется следующая формулировка: a×b×c / d, где a – длина гофра (мм), b – глубина гофра (мм), c – толщина стенки (мм), d – радиус загиба гофра (мм).

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в 2019 году [28] в лаборатории КазГАСА, были выявлены эффективные геометрические параметры для стенки толщиной 2 мм. Испытания проводились на крупномасштабной модели (масштаб 1:1) гофрированной балки постоянного сечения (полка 150×6 мм, стенка 600×2 мм, параметры гофра 280×45×2/30 мм) с пролетом 4200 мм (рис. 1).

Во время испытаний балки величина нагрузки измерялась с помощью электронного динамометра и дополнительно контролировалась манометром.

Прогибы фиксировались электронными прогибомерами с точностью 0,01 мм, при этом учитывалось и исключалось влияние перемещений модели, вызванных податливостью установки. Прогибомеры регистрировали вертикальные перемещения в точках приложения нагрузки и на опорах. Расчетная нагрузка Fp для испытуемых балок была принята равной 60 кН. Загружение осуществлялось ступенями: 10 кН на первых двух этапах и 5 кН на последующих. Перед проведением основного эксперимента выполнялось тестовое загружение до 35 кН с шагом 5 кН. В связи с относительно небольшими прогибами был выбран именно такой шаг нагрузки. После каждого этапа выдерживался временной интервал, и фиксировались показания прогибомеров.

Испытания проводились по однопролетной схеме с приложением сосредоточенной силы в середине пролета (рис. 2) при шарнирно-неподвижном и шарнирно-подвижном опирании. Граничные условия применялись к обоим концам модели балки в узлах поверхности торцевой плиты, ограничивая необходимые степени свободы. Левая часть балки закреплялась по осям X, Y и Z, правая часть – по осям Y и Z.

Общий вид балки и ее геометрические размеры представлены на рис.2.

Гофрированная стенка имела треугольную форму гофра с закругленными вершинами, длина волны составляла L_c = 280 мм, а высота волны h_r = 45 мм. В качестве материала для стенки и полок использовалась сталь 3СП согласно ГОСТ 380-2005 [29],



Рис. 1. Протестированная геометрия

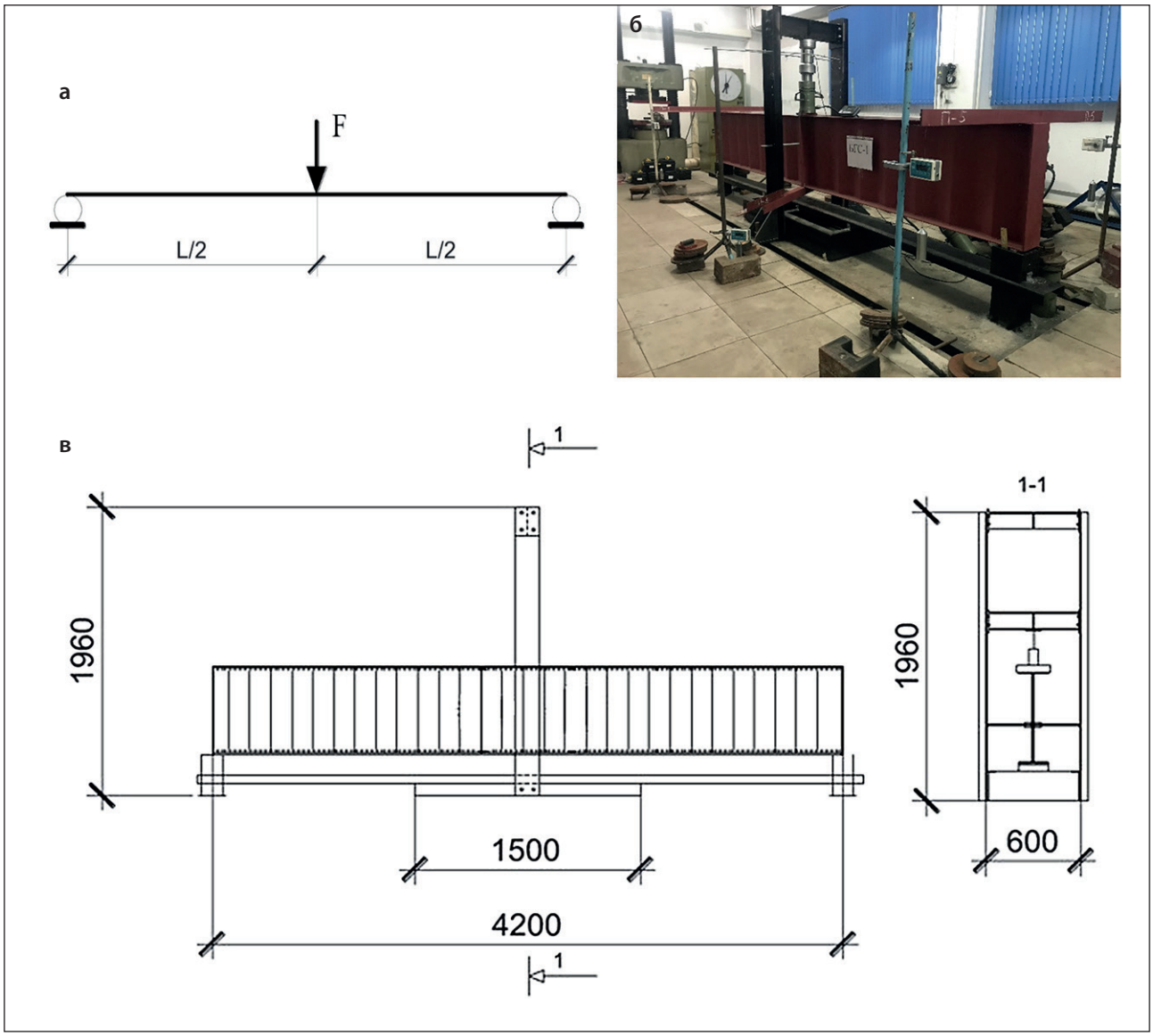


Рис. 2. Схема нагружения и испытательный стенд гофрированной балки: а – схема нагружения испытуемой модели; б – испытательный стенд для полноразмерных экспериментов; в – экспериментальная установка

соответствующая марке S245, с следующими характеристиками: предел текучести σ_y = 245 Н/мм², предел прочности σ_u = 370 Н/мм². Фактические значения составили σ_y = 339.7 Н/мм² и σ_u = 435.4 Н/мм² [28]. Балки были изготовлены на производственной площадке ТОО «Юсем Тау» в г. Алматы, Казахстан. Общий вид гофрированной балки представлен на рис. 2.

Нагружение балок осуществлялось с использованием гидравлических домкратов DG-25, через стальную пластину размером 100×20 мм и длиной, равной ширине полки (L = 150 мм). Схема нагружения представлена на рис. 2.

Наряду с анализом напряженно-деформированного состояния, изучались деформационные характеристики балок, поскольку в научной литературе существует недостаток данных о деформационных свойствах тонкостенных гофрированных стенок, что делает данное исследование актуальным для строительной практики.

Применение метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе LIRA-CAD 2022 для численного моделирования подкрановых балок с гофрированными стенками обосновано его высокой эффективностью в решении задач строительной механики. МКЭ позволяет точно учитывать сложную геометрию гофров, неоднородность напряженно-деформированного состояния, а также проводить валидацию результатов путем их сравнения с экспериментальными данными, что было успешно подтверждено в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Максимальная нагрузка $F_{e,max}$, кН	Изгибающий момент в середине пролета M_e, кН·м	Поперечная сила на опорах Q_e, кН	Прогиб (мм) Y_t	Y_e, мм	Характер разрушения образцов
150	157,5	75	8,04	13,28	Потеря местной устойчивости пояса

Для проверки вычислений методом конечных элементов (МКЭ) была использована крупномасштабная модель (масштаб 1:1), что позволило максимально приблизить условия численного моделирования к реальным условиям эксплуатации. В результате расхождения между экспериментальными и теоретическими данными были признаны незначительными.

На рис. 3 представлена корреляция между перемещением и приложенной силой для экспериментальных и численных (LIRA) данных, демонстрирующая схожие тенденции в обоих случаях. Численная модель в целом хорошо аппроксимирует экспериментальные значения, хотя наблюдаются незначительные расхождения. При малых нагрузках различия минимальны, однако с увеличением нагрузки отклонения возрастают. При силе 150 кН экспериментальное перемещение составляет 13,28 мм, тогда как программный комплекс LIRA предсказывает 12,9 мм, что соответствует расхождению в 2,9%. Вероятной причиной данной погрешности являются несовершенства граничных условий и невзятые в расчет остаточные напряжения. Несмотря на это, модель в LIRA обеспечивает достоверную оценку напряженно-деформированного состояния конструкции, а расхождения остаются в пределах допустимых значений.

В программном комплексе LIRA-CAD для анализа поведения подкрановых балок применяется метод конечных элементов (МКЭ). Балка дискретизируется на конечные элементы, причем для каждого элемента выбирается соответствующий тип КЭ, обеспечивающий точность моделирования его структурного отклика. Программное обеспечение использует численный подход к решению, при котором жест-

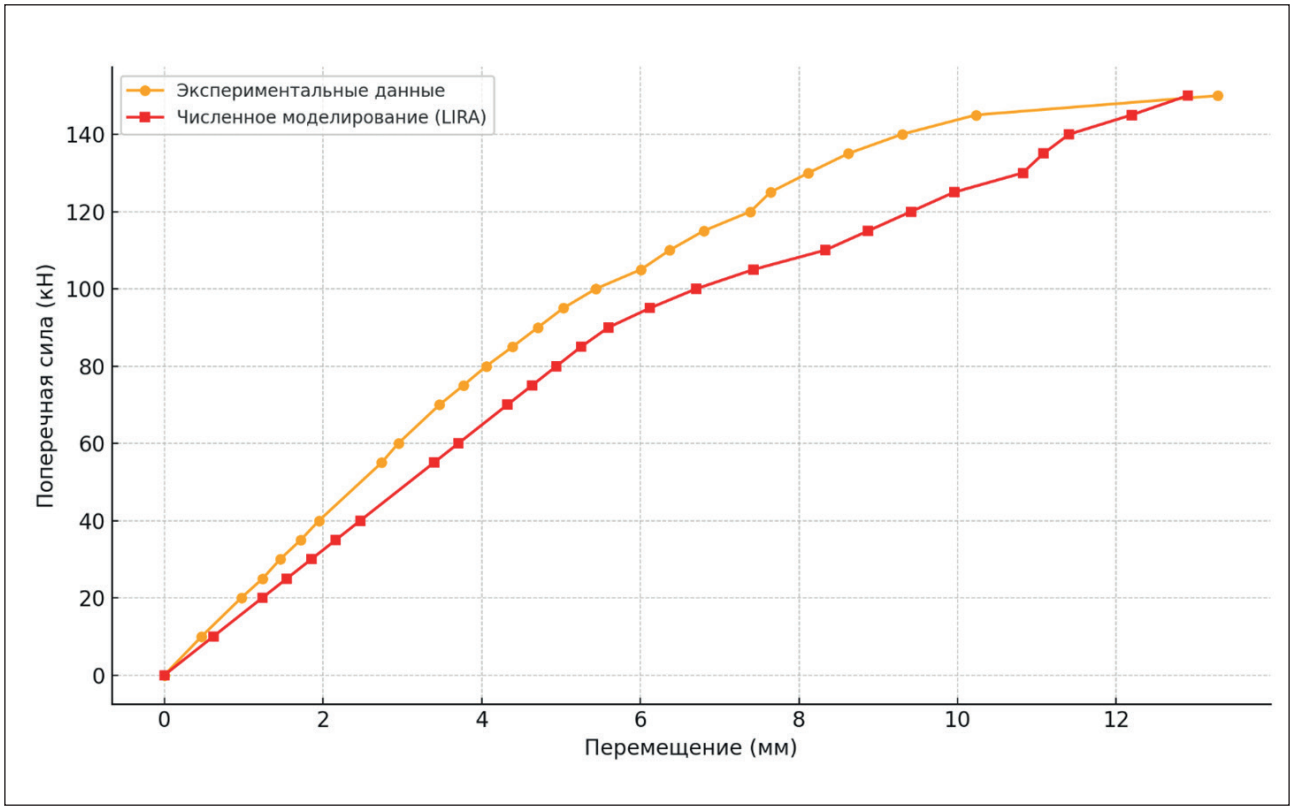


Рис. 3. Сравнение перемещений полки балки в физическом и компьютерном эксперименте

костная матрица элемента определяет связь между узловыми силами и перемещениями. В данном исследовании применяется нелинейный анализ, что позволяет наиболее точно воспроизвести поведение балки под нагрузкой. После решения системы уравнений определяются узловые перемещения, а затем вычисляются внутренние силы, характеризующие структурный отклик конструкции.

Несмотря на надежность численного моделирования в LIRA-CAD, могут возникать трудности, связанные с точным заданием граничных условий, особенно в области сварных соединений и опор, оптимизацией конечно-элементной сетки для адекватного учета сложной гофрированной геометрии, а также возможными нелинейными эффектами при высоких нагрузках. Для учета этих факторов потребовалась тщательная верификация и валидация результатов.

В рамках исследования были выбраны три уровня нагрузок и три типоразмера подкрановых балок, для которых проведен анализ деформаций и напряжений. Каждая конструкция подвергалась воздействию статических нагрузок от колес мостового крана. Экспериментальные исследования выполнялись на балке с треугольной гофрированной стенкой, установленной на шарнирно-опорные опоры.

Экспериментальные исследования гофрированных балок являются важным этапом проверки гипотез, касающихся принципов их работы и эффективности конструктивных решений. В действующих строительных нормах, как Казахстана, так и международных, отсутствуют конкретные требования к толщине, длине, глубине и радиусу кривизны гофрированной стенки.

Проведенные испытания позволили выполнить сравнительный анализ деформационных характеристик балок идентичного сечения в аналогичных эксплуатационных условиях, а также проверить достоверность численного моделирования. Полученные результаты моделирования в LIRA-CAD 2022 подтвердили пригодность данной программы для дальнейших численных исследований гофрированных двутавровых балок.

Численная модель была верифицирована с использованием метода конечных элементов путем сравнения полученных данных с экспериментальными результатами, приведенными в работе Брянцева (рис. 4), что подтвердило ее точность и надежность. На основе проведенного анализа были определены оптимальные размеры гофрированной стенки и выявлены эффективные параметры конструкции.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных данных, включающие ключевые механические параметры, измеренные в ходе исследования. В таблице приведены максимальная нагрузка ($F_{e,max}$) в кН, изгибающий момент в середине пролета (M_e) в кН·м, поперечная сила на опорах (Q_e) в кН, а также значения прогибов (Y_t и Y_e) в мм. Зафиксированные величины составляют: максимальная нагрузка – 150 кН, изгибающий момент – 157,5 кН·м, поперечная сила – 75 кН. Прогиб в контрольных точках измерений составил 8,04 мм и 13,28 мм соответственно. Полученные данные позволяют оценить напряженно-деформированное состояние исследуемых образцов при приложенных нагрузках.

Численное моделирование балок выполнено в программном комплексе LIRA-CAD с использованием метода конечных элементов. Граничные условия были наложены на оба конца модели балки в узлах поверхности торцевых пластин путем ограничения соответствующих степеней свободы. Фиксация балки осуществлялась вдоль осей Y и Z на обоих концах.

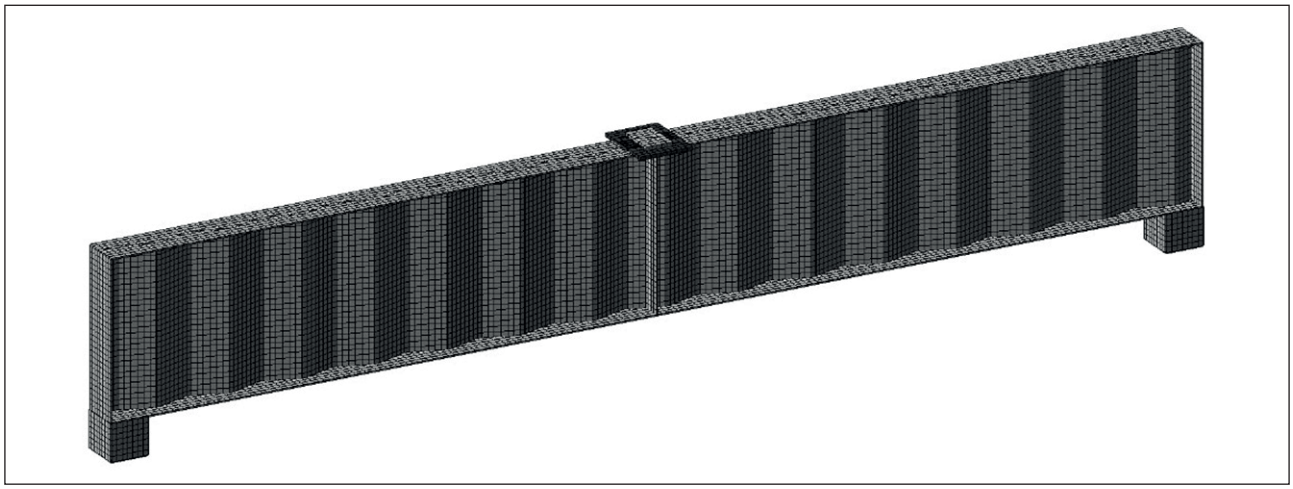


Рис. 4. Модель балки

В качестве материала для стенки и полок использовалась сталь S245 согласно ГОСТ 380-2005 [28], с пределом текучести σ_y = 339,7 Н/мм². В программном комплексе LIRA-CAD 2022 единицей измерения является т/м², поэтому значение приведено к 34 639,76 т/м². Модуль упругости материала составляет E = 206 000 МПа, коэффициент Пуассона – ν = 0,3. Предельная относительная деформация при сжатии и растяжении принята равной 0,025 (2,5%). В расчетах учитывалась нелинейная деформация конструкции (рис. 5).

В табл. 2 представлены основные результаты экспериментальных испытаний подкрановых балок. В перечень параметров включены: максимальная приложенная нагрузка $F_{e,max}$ (в кН), соответствующий изгибающий момент в середине пролета Me (в кН·м) и поперечная сила на опорах Q_e (в кН). Кроме того, в таблице приведены значения прогибов в середине пролета: теоретический прогиб Y_t и экспериментальный прогиб Y_e, измеренные в миллиметрах. Данные демонстрируют расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями

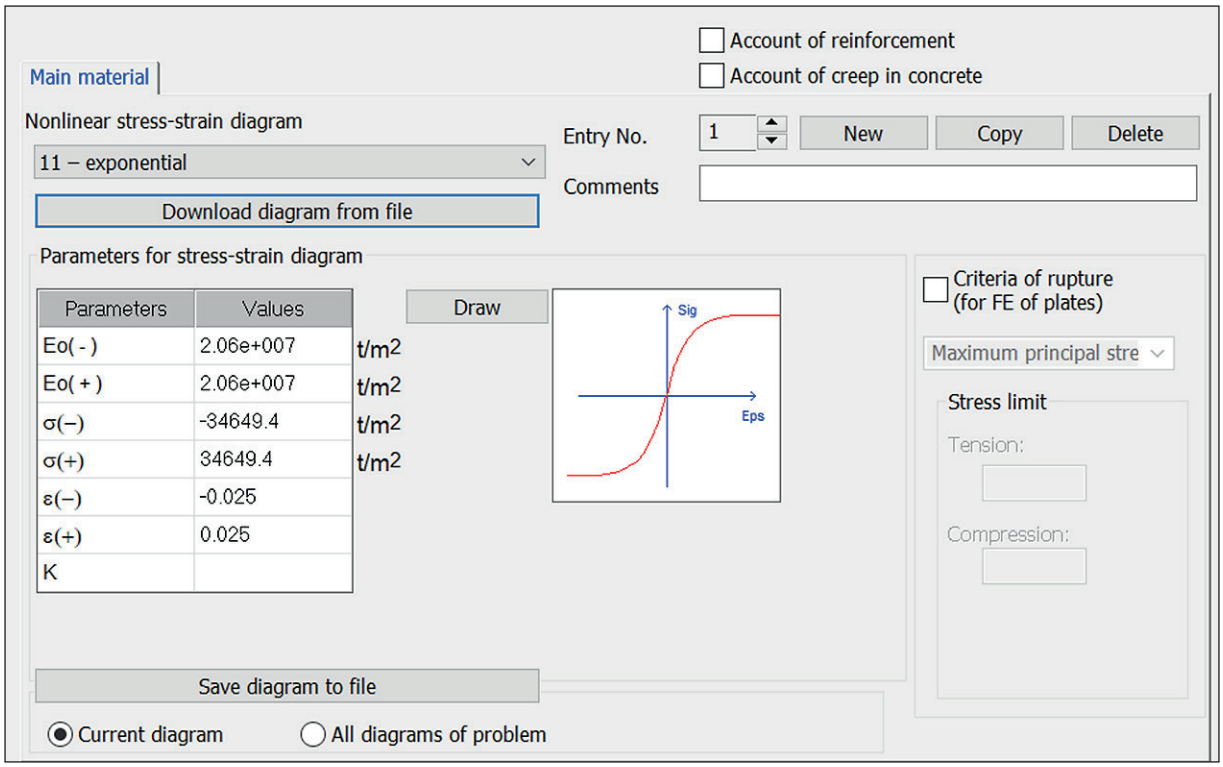


Рис. 5. Задание параметров нелинейной деформации материала

Таблица 2. Результаты экспериментальных данных

Максимальная нагрузка $F_{e,max}$, кН	Изгибающий момент в середине пролета M_e, кН·м	Поперечная сила на опорах Q_e, кН	Прогиб (мм) Y_t	Y_e
150	157,5	75	8,04	13,28

Таблица 3. Исследование независимости от сетки

Сетка №	i_x, pcs	i_y, pcs	ε, mm	%
1	211	8	10,1	–
2	421	16	13,6	34,65
3	841	31	12,9	5,1
4	1681	61	12,8	0,78

прогиба, что играет важную роль в верификации численных моделей и повышении точности расчетов при проектировании.

Разница между сетками № 3 и 4 составляет 0,78%, поэтому расчеты были продолжены с № 3 и размером пластины 5×5 мм.

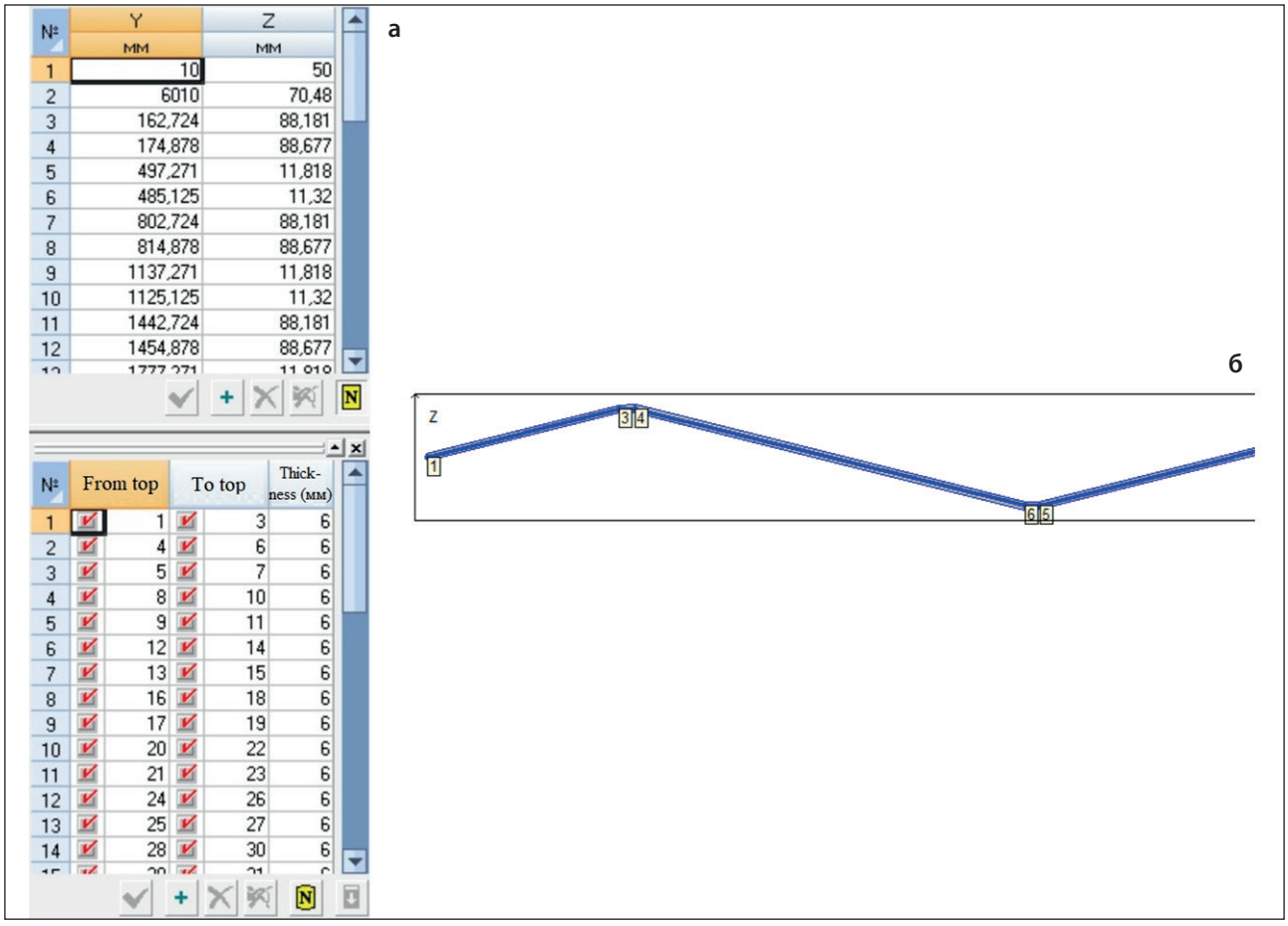
Согласно результатам компьютерного моделирования, разница в прогибах балки между физическим экспериментом (13,28 мм) и компьютерным экспериментом (12,9 мм) составляет 2,9%. Несоответствие объясняется неточностями при установке балки на испытательный стенд, а также невозможностью полностью учесть все параметры в расчетах.

Размерные характеристики балки с плоской стенкой были взяты из серии подкрановых балок, выпущенной Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций (ЦНИИпроектстальконструкция), Алматы, 1982 [31].

В дальнейшем были разработаны модели подкрановых балок с гофрированными стенками, проведен численный анализ, результаты которого были сопоставлены и описаны с учетом всех геометрических особенностей.

Эти координаты, представленные на рис. 6, затем были введены в постпроцессор расчетного комплекса Structure Computer-aided design (SCAD) Tonus для определения геометрических характеристик. Программное обеспечение Tonus предназначено для формирования поперечных сечений и расчета их геометрических характеристик на основе теории тонкостенных элементов.

Предыдущие исследования (Maximov et al., 2016) показали, что применение гофрированной стенки в балках значительно повышает их прочность и устойчивость. За счет использования более тонкой стенки возможно снижение расхода стали до 20%. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные А.А. Бряцевым в 2019 году в лаборатории КазГАСА, позволили определить оптимальные геометрические параметры гофрированных стенок с толщинами 6, 8 и 10 мм. Наиболее эффективной конфигурацией является стенка с длиной гофра 480 мм и глубиной 80 мм [29].



№	Y, мм	Z, мм
1	10	50
2	6010	70,48
3	162,724	88,181
4	174,878	88,677
5	497,271	11,818
6	485,125	11,32
7	802,724	88,181
8	814,878	88,677
9	1137,271	11,818
10	1125,125	11,32
11	1442,724	88,181
12	1454,878	88,677

№	From top	To top	Thickness (мм)
1	1	3	6
2	4	6	6
3	5	7	6
4	8	10	6
5	9	11	6
6	12	14	6
7	13	15	6
8	16	18	6
9	17	19	6
10	20	22	6
11	21	23	6
12	24	26	6
13	25	27	6
14	28	30	6

Рис. 6. Назначение координат для гофрированной стенки 640×80×6/30 в постпроцессоре SCAD Tonus: а – координаты; б – общий вид

В текущем исследовании полученные результаты отличаются, что обусловлено особенностями нагружения и эксплуатационными характеристиками подкрановых балок. Для сравнительного анализа были выбраны одна балка с плоской стенкой и одиннадцать балок с треугольной гофрированной стенкой различных профилей. В качестве эталонного объекта для сравнения использовалась балка с плоской стенкой, изображенная на рис. 4. Размерные характеристики балки с плоской стенкой приведены в табл. 4 [31].

На рис. 7 представлены геометрические размеры подкрановой балки с плоской стенкой. Высота стенки (h_w) составляет 640 мм, а ее толщина (t_w) – 6 мм. Верхний пояс имеет ширину (b_f^1) 250 мм и толщину (t_f^1) 10 мм, нижний пояс – ширину (b_f^2) 200 мм и толщину (t_f^2) 10 мм. Полная высота балки (h) составляет 660 мм. Эти размеры используются в качестве эталона для сравнительного анализа с балками, имеющими гофрированную стенку, в оценке их несущей способности и эксплуатационных характеристик.

Координаты крайних точек гофрированной стенки также были определены, как показано на рис. 8.

Подкрановая балка подвергается нагрузке от массы мостового крана. Были выбраны краны с грузо-

Таблица 4. Сравнительные размерные характеристики балки с плоской стенкой

h_w – высота стенки	t_w – толщина стенки	b_f^1 – ширина верхнего пояса	t_f^1 – толщина верхнего пояса	b_f^2 – ширина нижнего пояса	t_f^2 – толщина нижнего пояса	h – общая высота балки
640	6	250	10	200	10	660
840	8	250	10	200	10	860
990	10	320	12	200	10	1012

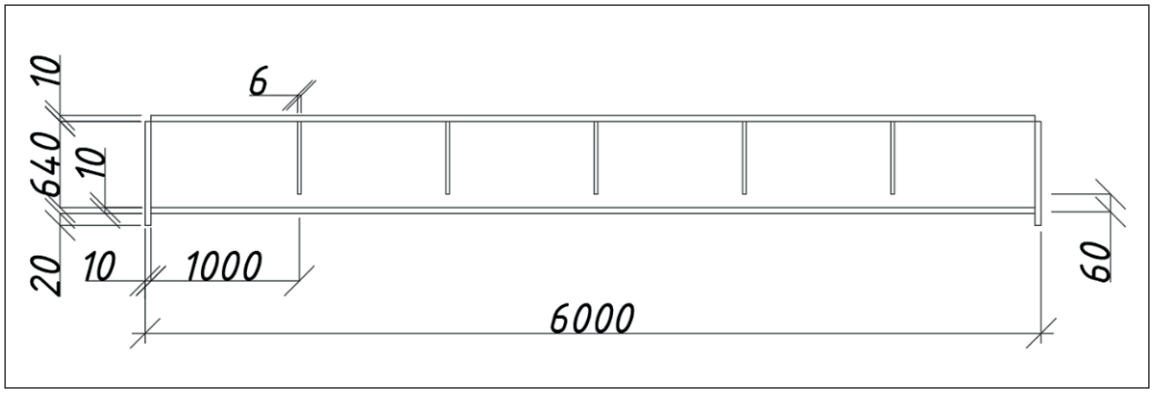


Рис. 7. Размеры подкрановой балки с плоской стенкой

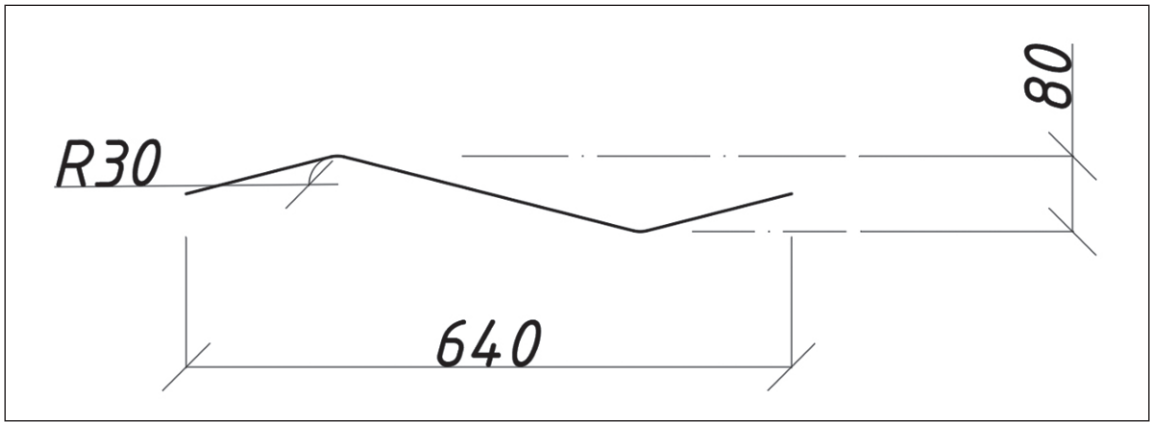


Рис. 8. Размеры гофрированной стенки 640×80×6/30

подъемностью 12,5, 32 и 50/12,5 тонн. Соответствующие колесные нагрузки приняты равными 0,95 кН, 2,25 кН и 3,35 кН в соответствии с ГОСТ 25711-83 [32]. В расчете учитываются масса крановых опорных конструкций, максимальная сила, передаваемая колесом крана, а также сумма ординат сил.

Нагрузка прикладывается от двух крановых колес с шагом, равным ширине базы крана B (рис. 9). Для легких кранов на одной стороне предусмотрены два колеса. База крана при грузоподъемности 10 тонн составляет 4,4 м, при 30 тоннах – 5,1 м, при 50 тоннах – 5,6 м [32].

На рис. 10 представлено приложение сосредоточенной нагрузки 0,95 кН от колеса крана без эксцентриситета. Анализ выполнен в программном комплексе LIRA-CAD 2022.

На рис. 10 представлены численные модели подкрановых балок, проанализированные в программном комплексе LIRA-CAD. Модель (a) представляет подкрановую балку с плоской стенкой, а модель (b) – подкрановую балку с гофрированной стенкой. Эти модели были разработаны для сравнительного анализа их несущей способности при воздействии нагрузок от колес крана, включая распределение напряжений, деформации и грузоподъемность.

Оценка экономической эффективности. Оценка стоимости изготовления подкрановых балок проведена с учетом различий в технологическом процессе.

Исходные данные:

Марка стали: S245

Стоимость стали: 1,5 €/кг

Затраты на рабочую силу:

Сборка и сварка элементов: 0,8 €/кг

Дополнительная сварка ребер жесткости (только для балки с плоской стенкой): 0,4 €/кг

Масса балок:

Балка с плоской стенкой: 440,7 кг

Балка с гофрированной стенкой: 419,3 кг

Различие в трудоемкости производства обусловлено особенностями изготовления балок. Балка с плоской стенкой требует выполнения трех операций: сборки, сварки и дополнительной сварки ребер жесткости. В то же время балка с гофрированной стенкой изготавливается за две операции, поскольку дополнительные ребра жесткости не требуются.

Применяемые нормативные документы включают:

EN 10025-2 – требования к горячекатаным конструкционным сталям, включая марку S245;

EN 1090-2 – регламент выполнения стальных конструкций, включая требования к сборке и сварке;

EN 1993-1-1 (Eurocode 3) – принципы проектирования стальных конструкций.

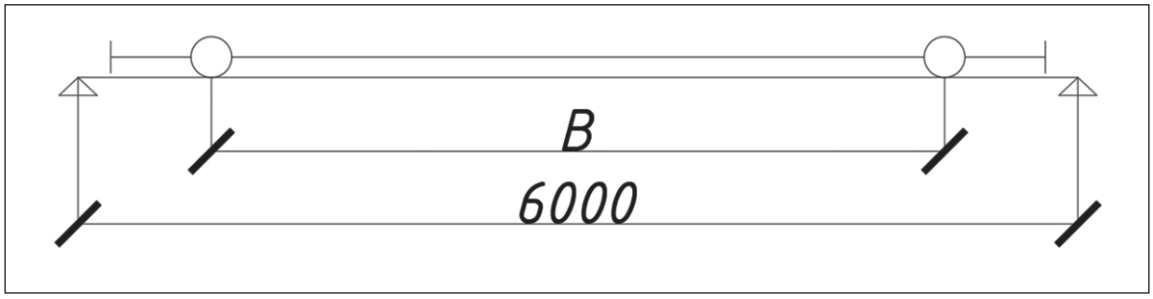


Рис. 9. Схема приложения нагрузки на подкрановую балку

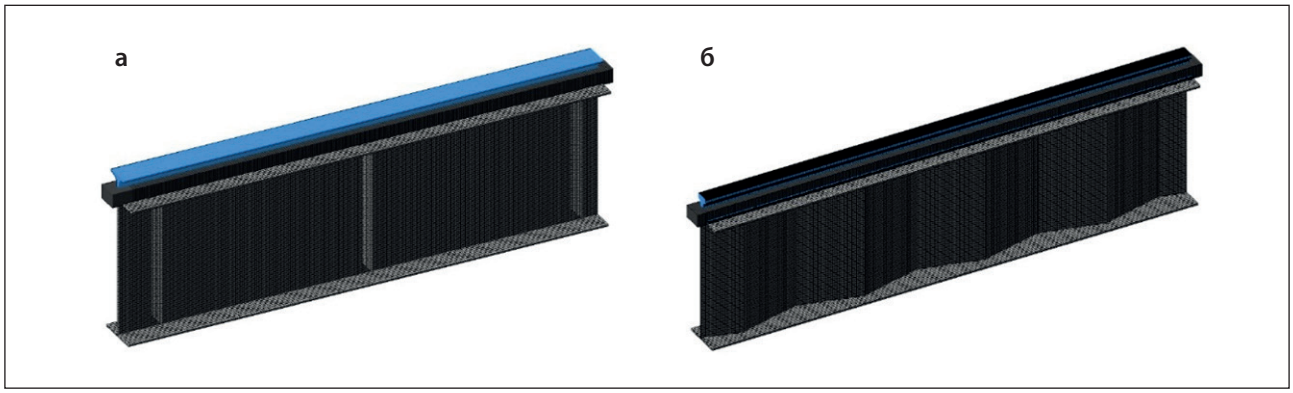


Рис. 10. Модели балок в программном комплексе LIRA-CAD: а – подкрановая балка с плоской стенкой; б – подкрановая балка с гофрированной стенкой

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Исследование оценивает конструкционные характеристики подкрановых балок с плоскими и гофрированными стенками при различных нагрузках. Интеграция численного моделирования и экспериментальных испытаний позволила провести анализ распределения напряжений, характера деформаций и несущей способности. Полученные результаты подтверждают преимущества балок с гофрированными стенками в отношении механической эффективности и оптимизации расхода материала.

Для дальнейшей количественной оценки преимуществ необходимо провести детальное сравнение балок с плоской и гофрированной стенкой. Такой анализ позволит выявить влияние различной геометрии стенки на конструкционную эффективность подкрановых балок.

Будут сравнены приведенные моменты инерции и приведенные моменты сопротивления, поскольку выбран параметр, остающийся постоянным для всех установленных форм гофрации. Такой подход позволяет комплексно оценить как общую устойчивость конструкции, так и несущую способность стенки.

Рис. 11, 12, 13 иллюстрируют изменения эквивалентного момента инерции и эквивалентного модуля сечения относительно центральной оси Y1 для различных типов стенок подкрановых балок, демон-

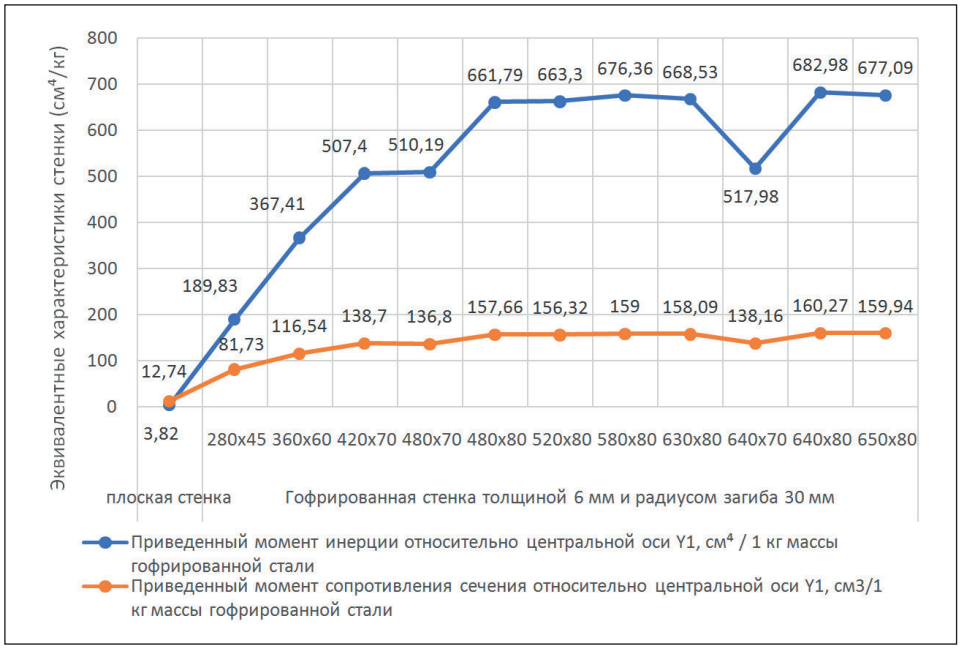


Рис. 11. Эквивалентные структурные характеристики стенок крановой балки с толщиной 6 мм и радиусом закругления 30 мм



Рис. 12. Эквивалентные структурные характеристики стенок крановой балки с толщиной 8 мм и радиусом закругления 30 мм

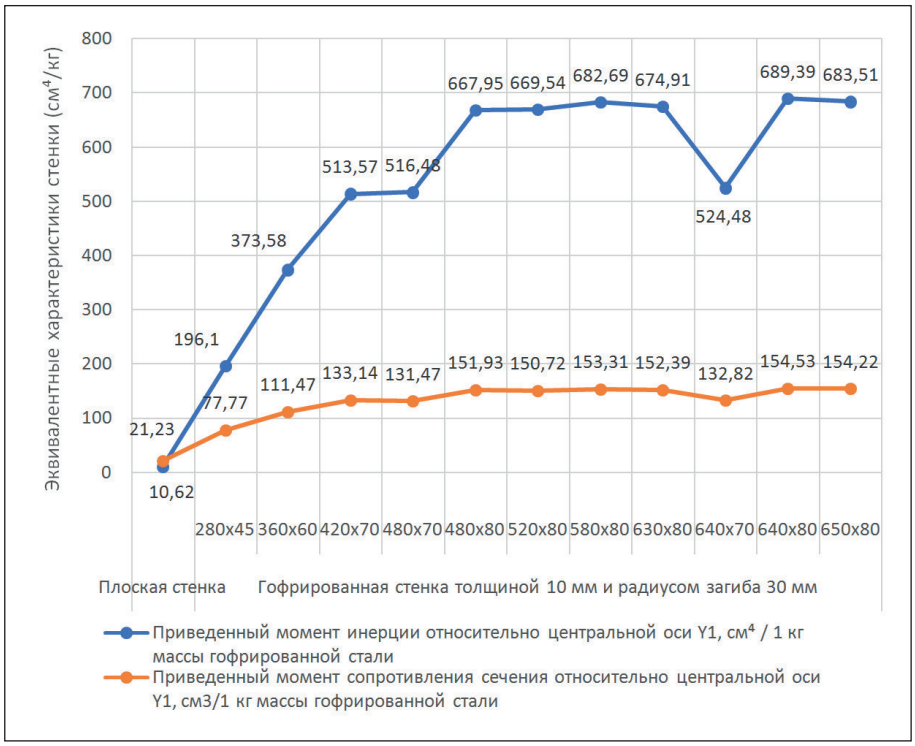


Рис. 13. Эквивалентные структурные характеристики стенок крановой балки с толщиной 10 мм и радиусом закругления 30 мм

стрируя улучшение конструкционной эффективности гофрированной стенки по сравнению с плоской.

Приведенный момент инерции рассчитывается по следующей формуле:

$$Ieq = \frac{1000 \cdot I}{\rho \cdot A}, \quad (1)$$

где:

Ieq – приведенный момент инерции, см⁴/кг,

I – момент инерции, см⁴,

ρ – плотность стали, г/см³,

A – площадь поперечного сечения, см².

Приведенный момент сопротивления рассчитывается по следующей формуле:

$$Weq = \frac{1000 \cdot W}{\rho \cdot A}, \quad (2)$$

где:

Weq – приведенный момент сопротивления, см³/кг,

W – момент сопротивления сечения, см³,

ρ – плотность стали, г/см³,

A – площадь поперечного сечения, см².

Рис. 11, 12 и 13 демонстрируют изменение эквивалентного момента инерции и эквивалентного модуля сечения относительно центральной оси Y1 на единицу массы гофрированной стали для стенок крановых балок с различными толщинами (6, 8 и 10 мм).

С учетом того, что толщина полки оказывает большее влияние на момент инерции, чем толщина стенки, и что толщина полок одинакова во всех вариантах, за исключением верхней полки балки с толщиной стенки 10 мм (где толщина полки составляет 12 мм), для всех трех толщин наблюдается четкая тенденция увеличения эквивалентного момента инерции с ростом размеров стенки с достижением максимальных значений при размере 640×80 для стенок толщиной 6 мм, 8 мм и 10 мм. Наибольшее значение эквивалентного момента инерции зафиксировано для стенки толщиной 10 мм, оно составляет 689,39 см⁴/кг. В то же время минимальные значения отмечены для сплошной стенки во всех случаях, причем наименьший показатель зарегистрирован для стенки толщиной 6 мм – 3,82 см⁴/кг.

Эквивалентный модуль сечения демонстрирует аналогичную тенденцию, но с меньшими вариациями. Максимальные значения зафиксированы для стенки толщиной 10 мм – 154,53 см³/кг, тогда как минимальные – для стенки толщиной 6 мм (12,74 см³/кг).

Таким образом, увеличение толщины стенки способствует улучшению как момента инерции, так и модуля сечения, что указывает на повышение несущей способности конструкции. Однако эффективность увеличения толщины снижается при значительном увеличении размеров стенки, что свидетельствует о наличии оптимального диапазона толщин для проектирования крановых балок.

Представленные данные позволяют провести сравнительный анализ различных конфигураций гофрированных стенок в металлических конструк-

циях с толщиной 6 мм, 8 мм и 10 мм. Параметры площади поперечного сечения, эквивалентной толщины сплошной стенки и расхода стали дают представление о влиянии модификации параметров гофров на структурные характеристики балки. Увеличение длины гофров способствует положительной динамике, выраженной в росте эквивалентного модуля сечения и момента инерции. Кроме того, увеличение глубины гофров также приводит к улучшению этих характеристик, что свидетельствует о повышении несущей способности. Наиболее оптимальные результаты зафиксированы для конфигурации 640×80, при которой достигнуты наивысшие значения параметров.

Рис. 14 демонстрирует характеристики напряженного состояния стенок крановой балки при различных нагрузках от колес. По мере увеличения нагрузки с 0,95 кН до 2,25 кН все значения напряжений становятся более отрицательными, что свидетельствует о росте уровня напряжений. Максимальное значение касательных напряжений для сплошной стенки достигает –783 кН/м² при нагрузке 2,25 кН, что является наибольшим зарегистрированным значением касательных напряжений.

В то же время нормальные напряжения вдоль оси X для гофрированной стенки демонстрируют менее отрицательные значения, с минимумом –542 кН/м² при 0,95 кН и –625 кН/м² при 3,35 кН, что указывает на меньший уровень напряжений по сравнению со сплошной стенкой. Касательные напряжения для обеих конфигураций стенок (сплошной и гофрированной) после 2,25 кН показывают тенденцию к увеличению, что свидетельствует о перераспределении сил при более высоких нагрузках.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что сплошные стенки испытывают более высокие напряжения, чем гофрированные, что подчеркивает эффективность гофрированных конструкций в снижении как нормальных, так и касательных напряжений.

Рис. 15 демонстрирует распределение поперечной силы в балках со сплошной и гофрированной стенкой при увеличении нагрузки. Максимальное значение поперечной силы вдоль оси X во фланце наблюдается для сплошной стенки и составляет 10,5 кН/м при нагрузке 3,35 кН, тогда как для гофрированной стенки оно достигает 10 кН/м при той же нагрузке. При нагрузке 0,95 кН поперечная сила вдоль оси X значительно ниже: 5,5 кН/м для сплошной стенки и 5 кН/м для гофрированной стенки.

Что касается поперечной силы вдоль оси Y во фланце, то сплошная стенка достигает пикового значения 8,5 кН/м при нагрузке 3,35 кН, в то время как для гофрированной стенки оно составляет 6 кН/м. При минимальной нагрузке 0,95 кН попе-

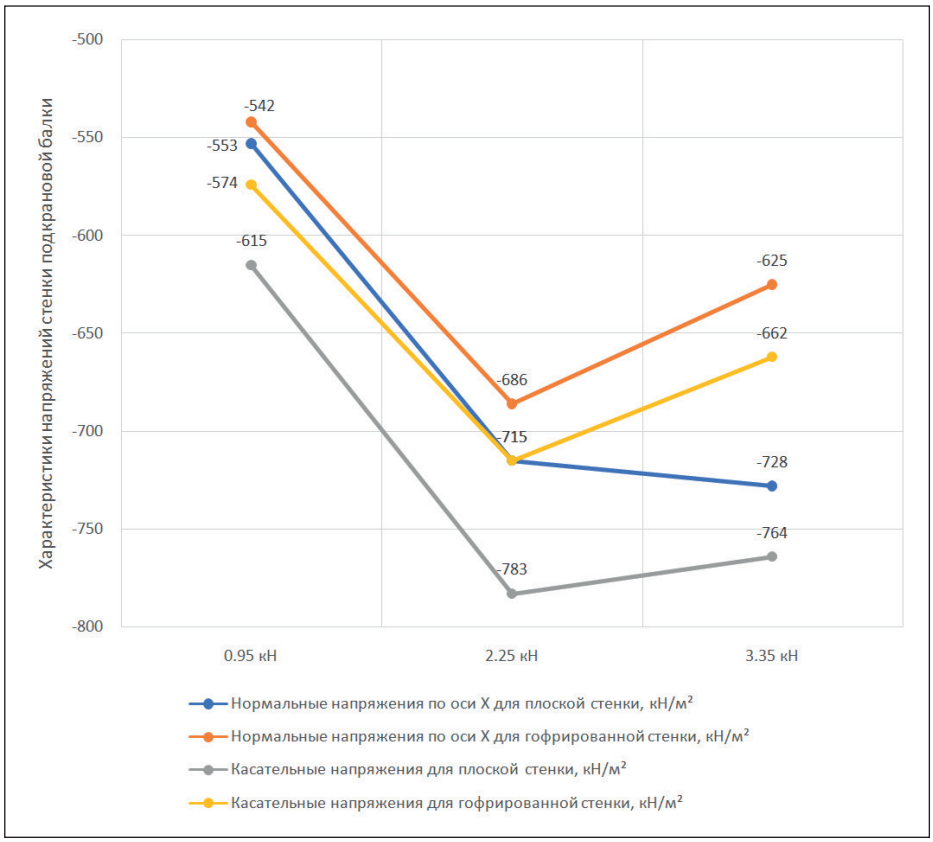


Рис. 14. Распределение напряжений в стенках крановой балки при различных нагрузках от колес

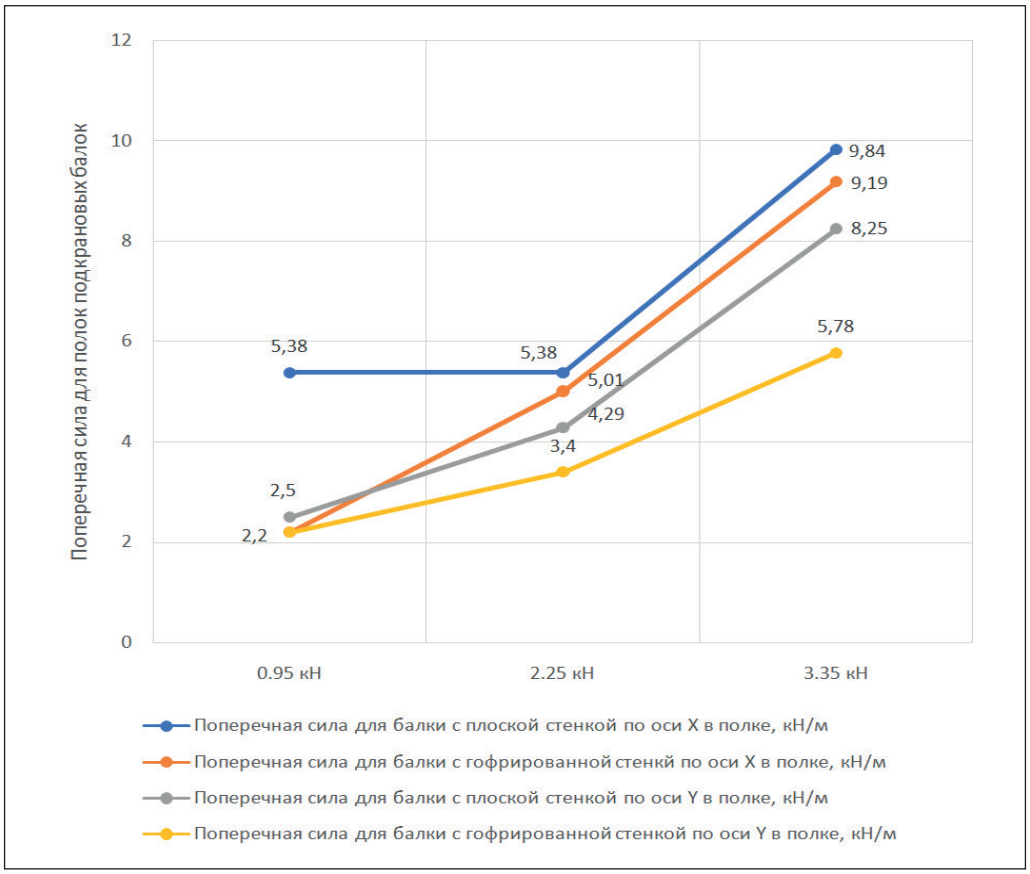


Рис. 15. Распределение поперечной силы в крановых балках со сплошной и гофрированной стенкой

речные силы остаются незначительными: 2,5 кН/м для сплошной стенки и 2 кН/м для гофрированной стенки.

Общая тенденция показывает, что поперечные силы увеличиваются пропорционально приложенной нагрузке, при этом сплошные стенки в целом испытывают более высокие касательные напряжения, чем гофрированные. Однако гофрированная стенка демонстрирует более равномерное распределение напряжений, что снижает их пиковые значения по сравнению со сплошной стенкой.

Смещения фланцев вдоль оси X для гофрированной стенки также стабильно ниже, чем для сплошной стенки, что свидетельствует о повышенной устойчивости конструкции при увеличении давления крановых колес, как показано на рис. 16.

Рис. 16 демонстрирует смещения фланцев вдоль оси X для балок со сплошной и гофрированной стенкой при увеличении давления от одного колеса мостового крана. Хотя значения смещения для гофрированной стенки неизменно выше, чем для сплошной, оба варианта остаются в пределах допустимых норм.

Все три графика подтверждают преимущества гофрированной стенки перед сплошной с точки зрения несущей способности конструкции. Графики показывают различия в напряженно-деформированном состоянии крановых балок со сплошной и гофрированной стенкой. В балке со сплошной стенкой (синие и серые линии) напряжения выше, чем в балке с гофрированной стенкой (оранжевые и желтые линии), что указывает на большую восприимчивость сплошной стенки как к нормальным, так и к касательным напряжениям. Гофрированная стенка, напротив, перераспределяет нагрузки более равномерно, уменьшая локальные концентрации напряжений.

В отношении поперечных сил сплошная стенка (сплошные линии) испытывает более высокие поперечные силы по осям X и Y по сравнению с гофрированной стенкой (пунктирные линии). Это указывает на то, что сплошная стенка более подвержена поперечным силам, в то время как гофрированная стенка перераспределяет нагрузки, минимизируя концентрацию поперечной силы.

Кроме того, величина прогиба сплошной стенки (синяя линия) выше, чем у гофрированной стенки (желтая линия), что свидетельствует о большей жесткости гофрированной конструкции и снижении вертикальных деформаций.

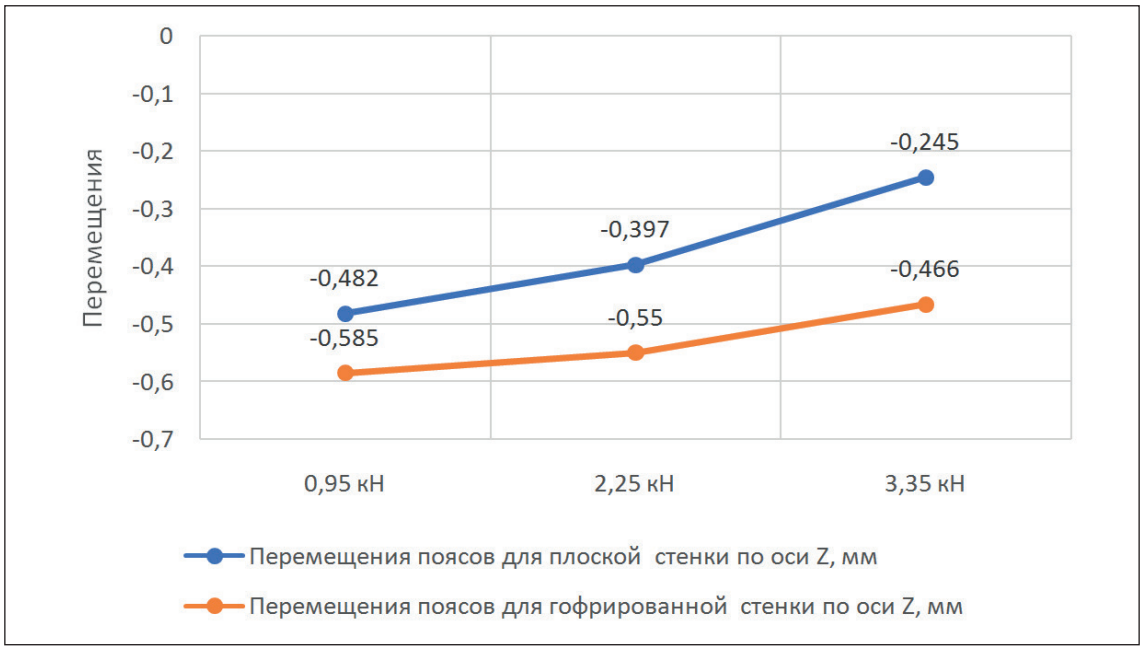


Рис. 16. Смещения фланцев вдоль оси X при различных нагрузочных условиях

Поскольку соединение фланцев со стенкой выполнялось автоматической сваркой, влияние остаточных сварочных напряжений отдельно в данном исследовании не анализировалось и не включалось в расчетную модель. Основное внимание было уделено общему напряженно-деформированному состоянию конструкции при статическом нагружении. Предполагается, что влияние сварочных напряжений носит локальный характер и не оказывает значительного влияния на общую прочность конструкции в рамках принятых допущений.

В целом, гофрированная стенка демонстрирует лучшую эксплуатационную эффективность за счет снижения напряжений, поперечных сил и деформаций по сравнению со сплошной стенкой, что подчеркивает ее конструктивные преимущества.

Экономический анализ

Сравнительный анализ стоимости изготовления крановых балок со сплошной и гофрированной стенкой включает стоимость материалов, сварки, сборки и общую итоговую стоимость производства каждого типа балки.

Для балки со сплошной стенкой стоимость материалов составляет 661,05 € при общем весе 440,7 кг и цене стали 1,5 €/кг. Производственный процесс включает три операции: сборку, сварку элементов и дополнительную сварку ребер жесткости. Стоимость сборки и сварки элементов составляет 352,56 €, а дополнительная сварка ребер жесткости – 176,28 €. В результате общая стоимость сварки составляет 528,84 €, что приводит к окончательной стоимости балки в 1137,70 €.

В отличие от этого, балка с гофрированной стенкой требует меньше операций, поскольку сварка ребер жесткости не выполняется. Стоимость материалов составляет 628,95 €, так как общий вес балки ниже – 419,3 кг. Стоимость сварки и сборки составляет 335,44 €, а итоговая стоимость изготовления балки составляет 940,20 €.

Сравнительный анализ показывает, что балка с гофрированной стенкой является более экономически выгодным вариантом благодаря меньшему расходу материала и отсутствию сварки ребер жесткости, что снижает трудоемкость и общие производственные затраты (см. табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в LIRA-CAD 2022, показал свою эффективность при моделировании крановых балок с гофрированной стенкой, обеспечивая точный учет сложной геометрии и неоднородности напряженно-деформированного состояния. Сравнение экспериментальных и численных результатов (рис. 3) демонстрирует их высокую корреляцию, причем отклонения остаются в допустимых пределах. При нагрузке 150 кН экспериментальное перемещение составило 13,28 мм, тогда как расчетное значение в модели LIRA составило 12,9 мм, что дает разницу в 2,9%. Данное расхождение обусловлено несовершенством граничных условий и неучтенными остаточными напряжениями.

Таблица 5. Сравнение стоимости изготовления балок

Тип балки	Общая масса (кг)	Стоимость материала (€)	Стоимость сварки (€)	Общая стоимость (€)
Балка с плоской стенкой	440,7	661,05	528,84	1137,70
Балка с гофрированной стенкой	419,3	628,95	335,44	940,20

Несмотря на незначительные отклонения, численная модель надежно оценивает поведение конструкции.

Результаты данного исследования подчеркивают конструктивные преимущества крановых балок с гофрированной стенкой по сравнению с балками со сплошной стенкой. Установлено, что гофрированная стенка обеспечивает более равномерное распределение нагрузки, снижает концентрацию напряжений и повышает общую жесткость конструкции, что согласуется с предыдущими исследованиями, посвященными механической эффективности гофрированных стальных конструкций.

В отношении напряженного состояния гофрированная стенка демонстрирует более низкие значения нормальных и касательных напряжений по сравнению со сплошной стенкой, что подтверждается графическими данными. Уменьшение значений напряжений свидетельствует о том, что гофрирование повышает способность стенки перераспределять нагрузки, минимизируя локальные концентрации напряжений и потенциальные слабые места конструкции. Эти результаты согласуются с ранее проведенными исследованиями механического поведения гофрированных пластин, указывающими на повышенную устойчивость к потере устойчивости и увеличение долговечности при циклическом нагружении.

Анализ поперечных сил дополнительно подтверждает конструктивную эффективность гофрированной стенки. Сплошная стенка испытывает более высокие поперечные силы вдоль осей X и Y, что свидетельствует о большей восприимчивости к сдвиговым деформациям. Напротив, гофрированная стенка обеспечивает более равномерное распределение усилий, что может способствовать увеличению срока службы и снижению затрат на техническое обслуживание.

Анализ вертикальных перемещений показывает, что гофрированная стенка демонстрирует значительно меньшие прогибы по сравнению со сплошной стенкой. Повышенная жесткость гофрированной стенки указывает на улучшенную устойчивость конструкции при изменяющихся условиях нагружения, что является ключевым фактором обеспечения долговечной эксплуатации крановых балок. Этот результат согласуется с численными моделями и экспериментальными исследованиями деформационного поведения гофрированных стальных балок, в которых оптимизированные параметры волновой геометрии повышают жесткость без чрезмерного увеличения массы конструкции.

Несмотря на очевидные преимущества гофрированной стенки, дальнейшие исследования необходимы для совершенствования методов проектирования и оптимизации геометрических параметров конструкции под конкретные условия эксплуатации. Перспективными направлениями исследований являются параметрические анализы различных форм гофров, углов наклона и толщины стенки, а также экспериментальная валидация моделей в условиях динамического нагружения.

В целом, проведенное исследование подтверждает, что использование гофрированных стенок в крановых балках способствует значительному улучшению распределения напряжений, снижению поперечных сил и контролю прогибов. Полученные результаты расширяют научное понимание применения гофрированной стали в строительных конструкциях и поддерживают дальнейшее развитие инновационных высокоэффективных решений в данной области.

Полученные выводы применимы к исследуемому профилю треугольного очертания гофра и не могут быть непосредственно экстраполированы на другие геометрии гофра. Существенные различия в форме и конфигурации гофров, такие как трапециевидные, синусоидальные или прямоугольные профили, приводят к изменениям в напряженно-деформированном состоянии, распределении нагрузок и концентрации напряжений. Поэтому требуется проведение дополнительных исследований для оценки применимости данных выводов к альтернативным профилям гофра.

В будущих исследованиях необходимо также учитывать потенциальные остаточные напряжения от сварки с целью оценки их влияния на прочностные характеристики конструкции и сопоставления результатов с существующими экспериментальными и нормативными данными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Li J., Yu J., Li Y. Drop Tests and Numerical Simulation of Composite Beams with Corrugated Web. *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics* 2023: 55. https://doi.org/10.16356/j.1005-2615.2023.01.006

2. Al-Mawashee, H.S. Al-Kannoon, M.A.A. Flexural Strength of Castellated Beams with Corrugated Webs. In Proceedings of the Journal of Physics: *Conference Series*. 2021; 1973.

3. Lukačević I., Ungureanu V., Numerical Parametric Study on Corrugated Web Built-up Beams with Pinned End Supports. *In Proceedings of the Cold-Formed Steel Research Consortium Colloquium*; 2022.

4. Kováč M., Ároch R. Influence of Imperfections in the Design of Crane Runway I-Beams. *Conference papers*. 2023; 6. https://doi.org/10.1002/cepa.2302

5. Euler M., Kuhlmann U., Fatigue Verification of Crane Runway Beams According to Eurocode 3. *Stahlbau*. 2019;88. https://doi.org/10.1002/STAB.201900093

6. Agüero A., Baláž I., Koleková Y., Moroczová L. New Interaction Formula for the Plastic Resistance of I- and H-Sections under Combinations of Bending Moments My, Ed, Mz, Ed and Bimoment BEd. *Structures*. 2021;29. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.059

7. Dürr A., Dreiling A., Bartenbach J. Existing Crane Runway Girders and Crane Runway Supporting Structures: Assessing & Evaluation, Damage Profiles and Further Operation. *Stahlbau*. 2019; 88. https://doi.org/10.1002/STAB.201900091

8. Ellifritt D.S., Lue D.M. Design of Crane Runway Beam with Channel Cap. *Engineering Journal*. 1998; 35. https://doi.org/10.62913/engj.v35i2.699

9. Dakov D., Belev B. Durability Issues Related to Detailing Links of Steel Crane Runway Beams to Columns. In Proceedings of the IABSE Congress. Christchurch 2020: *Resilient Technologies for Sustainable Infrastructure – Proceedings 2020.*

10. Seeßelberg C. On the Economic Design of Rolled Section Runway Beams for Top Mounted Overhead Cranes. *Stahlbau*. 2002;71. https://doi.org/10.1002/stab.200202190

11. Kossakowski P., Wciślik W., Bakalarz M. Failure of the Overhead Crane Runway. *MATEC Web of Conferences*. 2019;284. https://doi.org/10.1051/matecconf/201928409001

12. Citarelli S., Feldmann M. Fatigue Failure of Runway Beams Due to Wheel Loads. *ce/papers* 2019; 3. https://doi.org/10.1002/cepa.1110

13. Caglayan O., Ozakgul K., Tezer O., Uzgider E. Fatigue Life Prediction of Existing Crane Runway Girders. *J Constr Steel Res*. 2010;66. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.009

14. Keilpflug F., Kamenzky R., Alarcón D.J., Mallareddy T.T., Blaschke P. Structural Health Monitoring on Industrial Structures Using a Combined Numerical and Experimental Approach. *In Proceedings of the Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. 2020.

15. Mudenda K., Kabani M. A Proposed Approach for Obtaining the Shear Centre and Monosymmetry Constant for an I-Section Beam with a Welded Channel Cap. *International Journal of Steel Structures*. 2020;20. https://doi.org/10.1007/s13296-020-00411-8

16. Kornilova A.V., Safina L.K. On the Issue of the Admissibility of Defects in the Lower Chord of Crane Beams. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennost.i* 2023; 2023. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-6-23-28

17. Kovacevic S., Markovic N., Ceranic A. Bendic, M. Unfavorable Imperfection Shapes in Steel Plate Girders for Web Local Crippling. In Proceedings of the *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*. 2021.

18. Kirill, N. Nikolay, L. Igor, G. Crane Runway Beams: Endurance Test. 2017.

19. Bessimbayev Y.T., Niyetbay S.E., Awwad T., Kuldeyev E.I., Uderbayev S.S., Zhumadilova Z.O., Zhambakina Z.M. The Creation of Geotechnical Seismic Isolation from Materials with Damping Properties for the Protection of Architectural Monuments. *Buildings*. 2024;14:1572. https://doi.org/10.3390/buildings14061572i

20. Moga, C. Drăgan, D. Nerișanu, R. Effects of Shear Lag in Steel Box Girders of a Crane Runway. Ovidius University Annals of Constanta - Series Civil Engineering 2020; 22. https://doi.org/10.2478/ouacsce-2020-0003

21. Citarelli S., Feldmann M. Derivation of a New Fatigue Class for Top Flange to Web Junctions of Runway Beams. *In Proceedings of the Procedia Structural Integrity*. 2010;19.

22. Kraus M., Mämpel S., Crisan A. Influence of Rails on the Stability of Crane *Runway Girders. ce/papers*. 2017; 1. https://doi.org/10.1002/cepa.143

23. Sitthipong S., Meengam C., Chainarong S., Towatana P. Design Analysis of Overhead Crane for Maintenance Workshop. *In Proceedings of the MATEC Web of Conferences*. 2018; 207.

24. Movaghati S. Strengthening Beam Sections of Industrial Buildings against Lateral Torsional Buckling. *In Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Stability Conference*. 2019; 2.

25. Özkılıç Y.O., Bozkurt M.B. Numerical Validation on Novel Replaceable Reduced Beam Section Connections for Moment-Resisting Frames. *Structures* 2023; 50. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.027

26. Wei G.Q., Dong H.T., Li Y., Fan Q. Mechanical Performance of Crane's Main Girders with Corrugated Webs. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2015; 286. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44674-4_23

27. Kettler, M. Unterweger, H. Ebner, D. Lokale Spannungen in Kranbahnträgern Mit Längssteifen: Experimentelle Und Numerische Untersuchungen. *Stahlbau* 2021: 90. https://doi.org/10.1002/stab.202000069

28. Bryantsev A.A., Absimetov V.E., Lalin V. V. The Effect of Perforations on the Deformability of Welded Beam with Corrugated Webs. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 87. https://doi.org/10.18720/MCE.87.2

29. GOST 380-2005. Carbon steel ordinary quality. 2005. Available online: https://meganorm.ru/Data2/1/4293837/4293837742.pdf (accessed on 9 Decembet 2005).

30. Bryantsev A., Absimetov V., Laboratory Tests of Welded Corrugated Beams with Perforations. *In Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020; 70.

31. Melnikov N., Kuznetsov V., Bakhtutskiy V., Shuvalov L., Sorokina I., Assortment from Series 1.426.2-3 Steel crane beams. TsNIIProektstalkonstruktsiya 1982; 1.

32. GOST 25711-83 Electric overhead crane's general purpose with loading capacity from 5 to 50 tons Available online: Available online: https://meganorm.ru/Data2/1/4293837/4293837742.pdf (accessed on 12 April 1983).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Оканов Диас Алматович – PhD докторант, ассистент-профессор факультета общего строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, di.okanov@mok.kz, https://orcid.org/0000-0001-9645-3140

Брянцев Александр Александрович – доктор PhD, ассоциированный профессор, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, a.briantcev@mok.kz, https://orcid.org/0000-0002-6932-8202

Мехмет Бакир Бозкурт – доктор философии (PhD), кафедра гражданского строительства, Университет Маниса Джелал Баяр, Кампус шехида проф. д-ра Илхана Варанка, 45110, Юнусэмре/Маниса, Турция; mehmet.bozkurt@cbu.edu.tr, https://orcid.org/0000-0002-1213-3092

Ниетбай Саят Ержанулы – доктор PhD, ассоциированный профессор, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, s.nietbay@mok.kz, https://orcid.org/0000-0002-9748-6830

Молдамуратов Жангазы Нуржанович – PhD, профессор-исследователь факультета общего строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, доцент высшей школы передовых цифровых технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, zhanga_m_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4573-1179

ВКЛАД АВТОРОВ

Оканов Д.А. – написание статьи; научное редактирование текста; выявление зависимостей; проведение экспериментальной части исследования.

Брянцев А.А. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; научное редактирование текста; итоговые выводы.

Бозкурт М.Б. – подготовка образцов; написание статьи; обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Ниетбай С.Е. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Молдамуратов Ж.Н. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 08.04.2025; принята к публикации 12.04.2025.

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-151-172

CC BY 4.0

Modelling and efficiency assessment of vertically reinforced slab foundation of multi-storey building

Kanat T. Alenov[1], Yerik T. Bessimbayev[2], Kylyshbay A. Bissenov[1, 3], Assylbek S. Shadkam[2], Sayat E. Niyetbay[2, 4]*, Zhangazy N. Moldamuratov[4, 5]*

[1] Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan
[2] Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[3] Kyzylorda Open University, Kyzylorda, Kazakhstan
[4] International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan
[5] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

* Corresponding author: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to investigate the structural behavior and effectiveness of slab foundations reinforced with vertical elements, a technique increasingly employed in civil engineering to improve the performance of foundations on weak, compressible soil. Traditional slab foundations often suffer from excessive settlement and low bearing capacity, especially under high loads from multi-storey buildings. Reinforcement of the soil base provides a viable solution to these challenges by improving stiffness and reducing deformation. **Methods and Materials.** The study is based on numerical modeling using the finite element method (FEM) in PLAXIS 3D software, applying the Hardening Soil model in accordance with Eurocode 7. A 9-storey building with a monolithic slab foundation was modeled, and different configurations of vertical reinforcing elements were analyzed. The key parameters varied in the simulations included the spacing (2×2 m, 3×3 m, and 5×5 m) and length (2.5 m, 5.5 m, and 9.5 m) of reinforcing elements. Soil properties were derived from site-specific geotechnical investigations. **Results and Discussion.** The analysis showed that reinforcing the slab foundation significantly reduced deformation (by a factor of three) and bending moments (by up to 60%) compared to the unreinforced case. The most efficient configuration was found to be concrete elements of 9.5 m length with 2×2 m spacing. The use of vertical reinforcement not only increased the bearing capacity of the foundation but also optimized the stress distribution within the soil mass, minimizing differential settlement. **Conclusion.** Vertically reinforced slab foundations provide a reliable and cost-effective solution for construction on weak soils. The study confirms that optimal design of reinforcing elements – particularly their length and spacing – plays a crucial role in improving foundation performance. These findings can be directly applied to enhance the design and safety of multi-storey building foundations under challenging geotechnical conditions.

KEYWORDS: bearing capacity, soil model, slab foundation, settlement, vertical reinforcing element

FOR CITATION:
Alenov K.T., Bessimbayev Y.T., Bissenov K.A., Shadkam A.S., Niyetbay S.E., Moldamuratov Zh.N. Modelling and efficiency assessment of vertically reinforced slab foundation of multi-storey building. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):151–172. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-151-172. – EDN: YMAFFY.

© Alenov K.T., Bessimbayev Y.T., Bissenov K.A., Shadkam A.S., Niyetbay S.E., Moldamuratov Zh.N., 2025

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Моделирование и оценка эффективности вертикально армированного основания плитного фундамента многоэтажного здания

Канат Табынович Аленов[1], **Ерик Турашович Бесимбаев**[2], **Кылышбай Алдабергенович Бисенов**[1, 3], **Асылбек Сафаралиулы Шадкам**[2], **Саят Ержанулы Ниетбай**[2, 4*], **Жангазы Нуржанович Молдамуратов**[4, 5*]

[1] Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан
[2] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
[3] Кызылординский открытый университет, Кызылорда, Казахстан
[4] Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан
[5] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью данного исследования является оценка конструкционного поведения и эффективности плитных фундаментов, армированных вертикальными элементами — метода, который все чаще применяется в гражданском строительстве для повышения надежности фундаментов на слабых и сильно сжимаемых грунтах. Традиционные плитные фундаменты часто подвержены чрезмерным осадкам и обладают низкой несущей способностью, особенно при воздействии высоких нагрузок от многоэтажных зданий. Армирование основания грунта представляет собой эффективное решение этих проблем за счет повышения жесткости и снижения деформаций. **Методы и материалы.** Исследование основано на численном моделировании с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном обеспечении PLAXIS 3D, с применением модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil) в соответствии с требованиями Еврокода 7. В качестве объекта моделирования рассматривалось 9-этажное здание с монолитным плитным фундаментом, для которого анализировались различные конфигурации вертикальных армирующих элементов. Основные варьируемые параметры в моделировании включали шаг (2×2 м, 3×3 м и 5×5 м) и длину (2,5 м, 5,5 м и 9,5 м) армирующих элементов. Свойства грунтов были получены по результатам инженерно-геологических изысканий. **Результаты и обсуждение.** Анализ показал, что армирование плитного фундамента позволило значительно снизить деформации (в 3 раза) и изгибающие моменты (до 60%) по сравнению с неармированным случаем. Наиболее эффективной конфигурацией признаны бетонные элементы длиной 9,5 м с шагом 2×2 м. Применение вертикального армирования не только увеличило несущую способность фундамента, но и способствовало оптимальному перераспределению напряжений в массиве грунта, что минимизировало неравномерные осадки. **Заключение.** Плитные фундаменты с вертикальным армированием представляют собой надежное и экономически эффективное решение при строительстве на слабых грунтах. Проведенное исследование подтверждает, что оптимальное проектирование армирующих элементов – в частности, их длины и шага – играет ключевую роль в повышении эффективности фундаментов. Полученные результаты могут быть напрямую применены для улучшения проектирования и обеспечения надежности фундаментов многоэтажных зданий в сложных инженерно-геологических условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несущая способность, модель грунта, плитный фундамент, осадка, вертикальный армирующий элемент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Аленов К.Т., Бесимбаев Е.Т., Бисенов К.А., Шадкам А.С., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н. Моделирование и оценка эффективности вертикально армированного основания плитного фундамента многоэтажного здания. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):151–172. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-151-172. – EDN: YMAFFY.

INTRODUCTION

Currently, challenges often arise when developing areas previously considered unsuitable for the construction of multi-story buildings. With increasing loads on the base or under unfavorable geotechnical conditions at construction sites, ensuring the quality of geotechnical design becomes a critical issue in construction.

National standards in many countries recommend solving these problems using technical and economic calculations by comparing options with other traditional solu-tions about specific engineering and geological conditions. Despite this, we often face an increase in load transferred to the foundation, which often does not yield the de-sired results. This issue is especially acute when soft soils have a significant depth [1].

A more effective design solution for multi-story buildings with a frame-and-space system is the use of a foundation slab on a natural base. This solution is particularly relevant when construction takes place on collapsible soils to ensure the reliability of building structures, foundations, and bases. Due to its design and load distribution capacity, a slab foundation provides high stability and strength to the structure.

Despite these advantages, experts note the occurrence of elastoplastic defor-mations in the perimeter zone of the foundation slab. Therefore, for multi-story buildings, a pile or pile-slab foundation is recommended, along with the improvement of the construction properties of the soil base [1–5].

Construction design standards of Kazakhstan, modified to Eurocodes, advocate strengthening the foundation soil with vertical reinforcing elements to improve foun-dation soil construction qualities [6, 7]. In this situation, reinforced soil should be viewed as an artificial soil mass with enhanced qualities due to the presence of rein-forcing components. When reinforcing natural soils in the foundations of buildings and structures, cement-soil, crushed stone, sand, lime, and other types of vertical reinforc-ing elements should be used in justified cases, as the massive acquires anisotropy of mechanical and filtration properties, increasing bearing capacity with a decrease in compressibility or a change in the direction of its deformations or acceleration of con-solidation during the compaction process [8].

Studies show that a critical advantage of improving the physical and mechanical characteristics of soils by reinforcement is that it allows the creation of the required base from the existing (local) soil. This reduces the lab our intensity of soil compaction works or their replacement, increases the safety of the building and reduces the time of their erection. Such reinforced soil withstands uneven deformations of buildings and structures in complex engineering and geological conditions [9].

The effectiveness of the reinforcement element in the soil is ensured by lateral compression and friction forces. These forces play a crucial role in the transfer of load from the overlying structures through the soil of the cushion to the elements of vertical reinforcement and to the surrounding soil. The reinforcement takes the load with its upper part through the contact surface with the soil or the foundation and transfers it to the underlying layers with its lower part. The vertical bars are used to absorb com-pressive stresses.

Experimental and theoretical research findings have revealed that the stress-strain state of slab foundations on bases reinforced with vertical elements depends on the soil's design model, the structural solution of the vertically reinforced foundation, and many other factors [10–13].

Calculation-experimental studies of geotechnical objects are carried out on the two most popular elastic-plastic models, the Coulomb-Mohr model and the Hardening Soil model. The results of calculations by the PLAXIS program allowed us to take into account the area of applicability of models with the purpose of the design problem and recommends the Hardening Soil model for calculations of the stress-strain state of ge-otechnical objects under construction and the Coulomb-Mohr model – to assess the limit stress state [14–20]

Recently, in many countries, when assessing the reliability of geotechnical projects, design concepts based on indicators of reliability and probable variability of the entire spatial system, both above-ground structures and the soil mass under the structure, have been practiced [21–24].

Based on nonlinear analysis, some theoretical models are based on reliability and probability of failure or failure. The EN 1997 Eurocode, based on limit state conditions, also considers the ultimate limit state (ULS) associated with failure or failure, with the definition of failure criteria, depending on the possible cause of failure. Probability theory applications in determining the strength and safety factor of a geotechnical system have been used to solve risk-based geotechnical problems [25, 26].

However, some authors have recommended caution when using the reliability index, especially when the performance function is highly nonlinear, and the random variables do not have a normal distribution. Therefore, the randomness of both ge-otechnical parameters and loads should not be allowed by the norms used in foundation design [27].

Among all existing methods of calculating reinforced soil foundations (empirical, analytical, and numerical methods), numerical methods are the leading ones, which allow for the estimation of the stress-strain state of the soil with a certain degree of accuracy. The effectiveness of numerical methods is related to the fact that existing analytical calculation methods do not allow for sufficiently accurate predictions of the settlement of reinforced bases during soil mass deformations caused by the disruption of soil structure. Empirical methods have limited application conditions and require extensive and expensive field experiments for their realization. For a more accurate prediction in the case of significant settlements and the transition of the soil foundation into the elastic-plastic stage of work, it is necessary to solve a nonlinear problem using calculation methods that consider the soil work's plastic characteristics. In contrast to empirical and analytical methods, numerical methods are more universal.

The application of specialized, complex programs has allowed us to consider the nonlinear properties of foundation soils when solving geotechnical problems. The use of modern PCs such as MIDAS GTX, Plaxis 3D, and others when calculating slab foundations in complex geological conditions allows us to take into account not only the deformation of the foundation but also the stress-strain

state of the entire structural system located on the slab foundation [28–31].

Despite this, in design practice, many questions arise related to accounting for soil heterogeneity in the plan, the stress-strain state of reinforcing elements and the space between them over time, determining the required quantity and size of reinforcing elements, their optimal placement, predicting load-bearing capacity and deformability, and selecting optimal construction methods, considering the requirements for cost-efficiency, reliability, and environmental safety of the adopted solution.

This work aims to identify the regularity of the stress-strain state of reinforced soil masses and develop a structural solution for the vertically reinforced base of a slab foundation for a multi-storey building. The research was carried out using the struc-tural solution of the reinforced foundation of a real object as an example. In design practice, many questions arise regarding the need to consider the heterogeneity of the soil in the plan, the stress-strain state of reinforcing elements and the space between them over time, establishing the necessary number and size of reinforcing elements, their strategic placement, predicting the bearing capacity and deformability, and se-lecting the most efficient methods of work while considering the requirements of economy, reliability, and environmental safety.

1.1 Problem statement

To solve the set problems, we consider the stress-strain state of a large slab on an elastic soil base. In the case of anomalous layers, we introduce an additional coefficient of the loaded area shape $b_f = 2m_{eq}$.

Thus, the vertical displacement of the base of a rigid foundation slab is deter-mined by the following approximate analytical expression (1).

$$W = \frac{\beta_{equ} * qH}{E_{equ}} = \beta_{equ} * \frac{PH}{E_{equ} * S}, \quad (1)$$

where W = vertical displacement of the base of the foundation slab;

β_{equ} = shape factor of the loaded area, given by $\beta_{equ} = \beta_g \cdot b_f$;

β_g = Poisson's ratio for the soil foundation;

b_f = shape coefficient of the loaded area, which accounts for anomalous layers and is given by $b_f = 2m_{eq}$;

P = total load applied to the slab (in terms of force, such as Newtons);

H = thickness (depth) of the deformed layer of soil;

E_{equ} = equivalent modulus of deformation of the soil foundation;

S = area of the slab (in square meters).

The equivalent modulus of deformation of the modelled homogeneous foundation will depend on the dimensional and physical-mechanical parameters of layers with different bearing capacities and their respective depths.

It should be taken into account that when modelling the base deformations of a large-size foundation slab under uniform load on the slab, the horizontal displacement components in any horizontal planes in the slab plan are much smaller than the vertical component. Therefore, they are not considered.

It is important to note that this calculation, which accounts for the combined interaction of the footing, slab, and superstructure, is based on the following assumptions:

- vertical displacements of the points of the building and the foundation are the same,
- an orthotropic slab of constant thickness,
- there are no friction forces between the slab and the base,
- the stiffness coefficient characterizes the base of the slab.

Designing the base of the real object is carried out from the following conditions:

- determination of the required length of the reinforcing element to ensure the bearing capacity of the deformed soil mass,
- determining the distance between the reinforcing element's axes to reduce the slab foundation's deformation.

A 50 cm thick soil cushion (buffer layer) is created by layer-by-layer compaction of crushed stone soil to distribute the load evenly on the reinforced soil base.

Installing a vertical reinforcing element in the soil foundation is recommended as a more efficient and practical technology than borehole rolling.

METHODS AND MATERIALS

For the calculation, we utilize the PLAXIS software program based on the finite element technique, which calculates the deformation and stability of various geotechnical objects. As a computational model of the soil, we chose the elastic-plastic model of hardening soil. The HardeningSoil model more realistically describes the behavior of soils under loading compared to the traditional Moore-Coulomb model and is used for more accurate modelling of soil behavior under loading in geotechnical engineering.

As a design material, we use the model of a 9-storey monolithic building, rectangular in plan, with axis dimensions of 29.6×16.4 m. The building's structural scheme is a cross-wall (Fig. 1).

The foundation is a monolithic slab with a height of 100 cm. The walls are monolithic with variable thickness, and the ceiling slabs are monolithic with a thickness of 20 cm. All structures are made of concrete of class C25/30.

The calculation uses the finite element method to describe the processes occurring in a continuous soil medium accurately. By changing the geometric shape of the finite element mesh, displacements and forces at

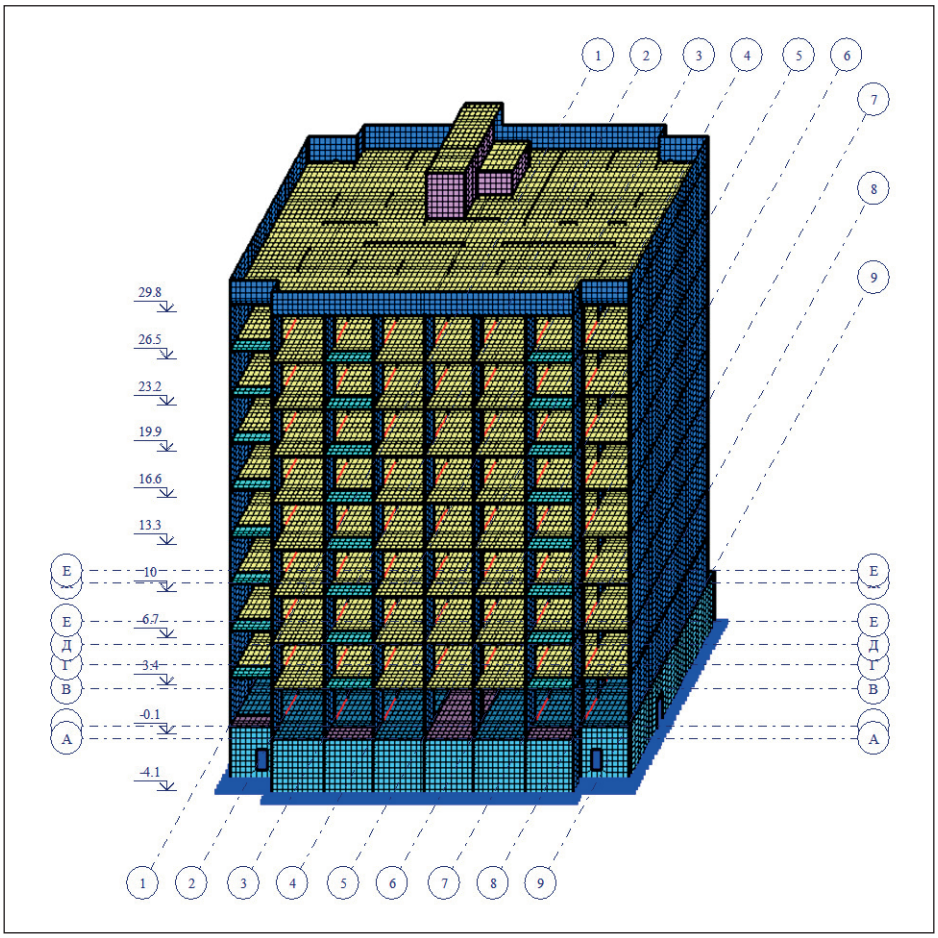


Fig. 1. Structural scheme of the building

nodal points from external actions can be determined. The central output values of the finite element calculation are displace-ments and forces at the nodal points of the foundation and the slab foundation.

Data from engineering-geological surveys of the real object were used for calculation. Table 1 presents the characteristics of soils by engineering-geological elements (EGE).

Table 1. Characteristics of soils on the engineering-geological section to a depth of 25 m

Soil type	Charachteristics	Additional parameters for the HSS model
EGE-1 dusty grey sandy loam with vegetation residues, with sand interlayers, fluid	γ = 18.8 кН/м^3, ν = 0.35, c = 7 KPa, φ = 21, E = 5400 KPa	E_{50}^{ref} =5400 кПа, E_{oed}^{ref} =5400 KPa, E_{ur}^{ref} = 16200 KPa, Ko = 0.642
EGE-2 dusty loams grey vaguely layered with plant remains flowing	γ = 18.9 кН/м^3, ν = 0.35, c = 4 KPa, φ = 17, E = 5000 KPa	E_{50}^{ref} = 5000 кПа, E_{oed}^{ref} = 5000 KPa, E_{ur}^{ref} = 15000 KPa, Ko = 0.708
EGE-3 dusty sandy loam grey with gravel, pebbles, with interlayers of loam plastic	γ = 21.4 кН/м^3, ν = 0.35, c = 20 KPa, φ = 21, E = 12000 KPa	E_{50}^{ref} = 12000 KPa, E_{oed}^{ref} = 12000 KPa, E_{ur}^{ref} = 36000 KPa, Ko = 0.642
EGE-4 dusty sandy loam grey with gravel, boulders with interlayers of loam, hard	γ = 18.8 кН/м^3, ν = 0.35, c = 7 KPa, φ = 21, E = 5400 KPa	E_{50}^{ref} = 5400 кПа, E_{oed}^{ref} = 5400 KPa, E_{ur}^{ref} = 16200 KPa, Ko = 0.642

To build a geological model of the base of the building on PLAXIS, took the soil array with side dimensions of 80x120 m, shown in Fig. 2 and the data of the geological model of the soil array in graphical form Fig. 3.

Fig. 4 shows the calculated characteristics of the foundation slab used to evaluate the stress-strain state at different stages of loading prepared using graphical means.

The average pressure on the foundation slab from the weight of overlying struc-tures and normative loads is 20.0 t/m^2 (Fig. 5).

RESULTS AND DISCUSSION

When the foundation was loaded with the weight of the foundation slab and overlying structures, the deformed scheme of the soil mass was obtained (Fig. 6). The difference in the changes of the finite element mesh can be seen.

The results of calculations on the Hardening soil model show that the maximum deformation value of 124.3 mm is recorded in the central part of the foundation

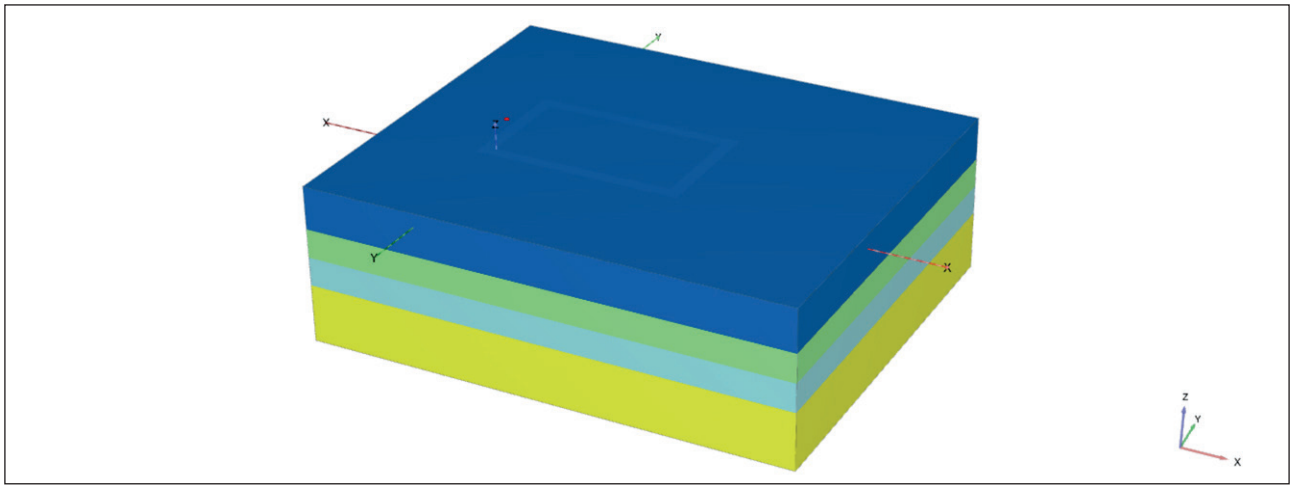


Fig. 2. Soil characteristics from the engineering geological section in PLAXIS

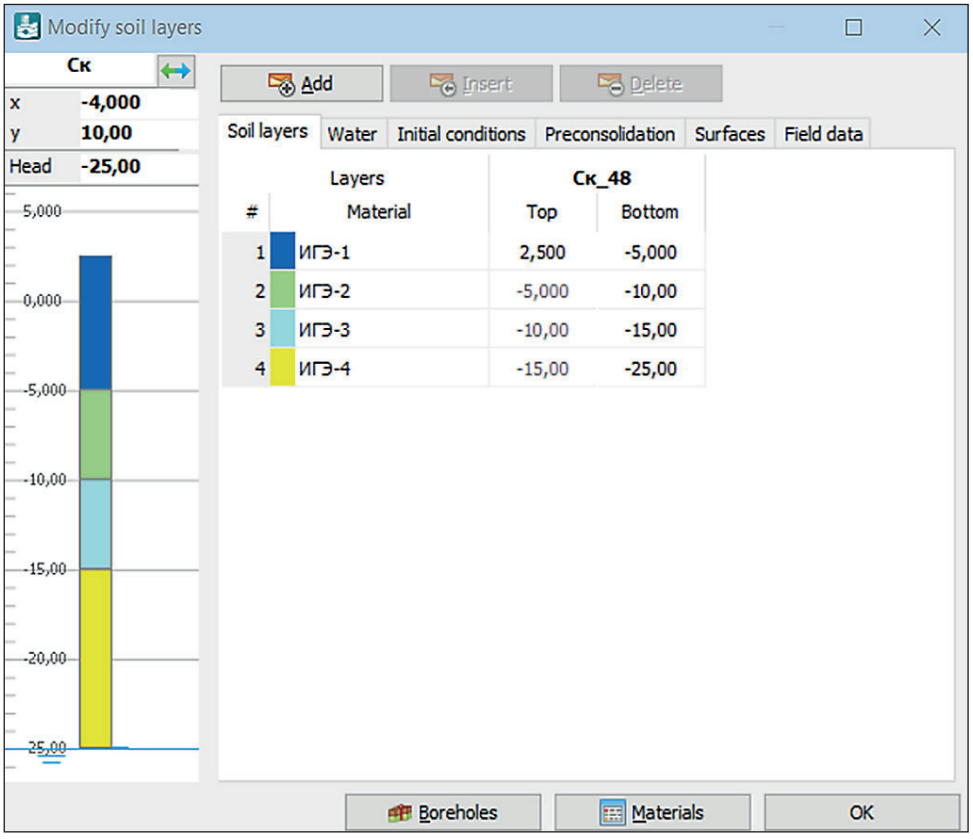


Fig. 3. Geological model of the soil massif in the graphical form of PLAXIS software

Plate - Фундаментная плита C20/25

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Фундаментная плита C20/25
Comments		
Colour		RGB 251, 255, 0
Material type		Elastic
Properties		
d	m	1,000
γ	kN/m³	25,00
Isotropic		☑
E_1	kN/m²	30,60E6
E_2	kN/m²	30,60E6
ν_{12}		0,1500
G_{12}	kN/m²	13,30E6
G_{13}	kN/m²	13,30E6
G_{23}	kN/m²	13,30E6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Prevent punching		☐

Fig. 4. Characteristics of a foundation slab with a thickness of 1.0 m (Concrete C25/30) in graphical form in the PLAXIS program

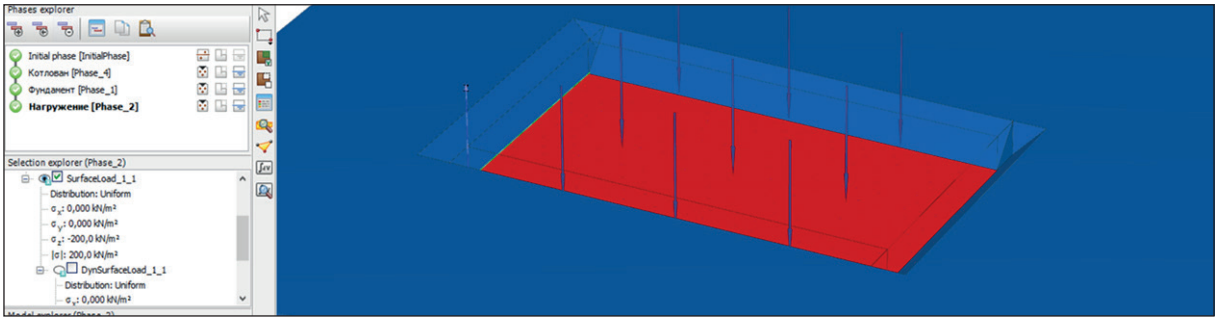


Fig. 5. Average pressure on the slab – 20.0 t/m²

slab (Fig. 7). At the same time, the character of deformations in the form of sedimentation funnel on the surface of the foundation also has a remarkable similarity due to the use of the unified theory of elastic half-space in the models. The deformed state of the finite element mesh in the shape of a sedimentation funnel, with less deformation closer to the slab's edge, corresponds to the creation of plastic deformations in the soil.

The results of forces and bending moments in the foundation slab from the ap-plied external actions correspond to the boundary conditions and the given load. The maximum force N, equal to 1461.2kN/m, is recorded at the edges of the foundation slab (Fig. 8). This can be explained by the incomplete diagram of contact pressures at the edges approximated by a piecewise constant function. The value of the maximum moment M, 476.2 kN/m, recorded at the areas closer to the edge zone (Fig. 9), is caused by the nonlinear behavior of the soil and the appearance of plastic deformation zones. The value of the moment at the foundation differs by a factor of 3. The calculations show that considering the foundation's nonlinear operation does not significantly affect the stress-strain state of the foundation slab. Only the absolute settlement of the structure increases with the inclusion of nonlinear operation. The results presented in this calculation show that even with homogeneous properties of the soil in plan, ac-counting for the plastic behavior of the base, in some cases, influences the stress-strain state of the slab.

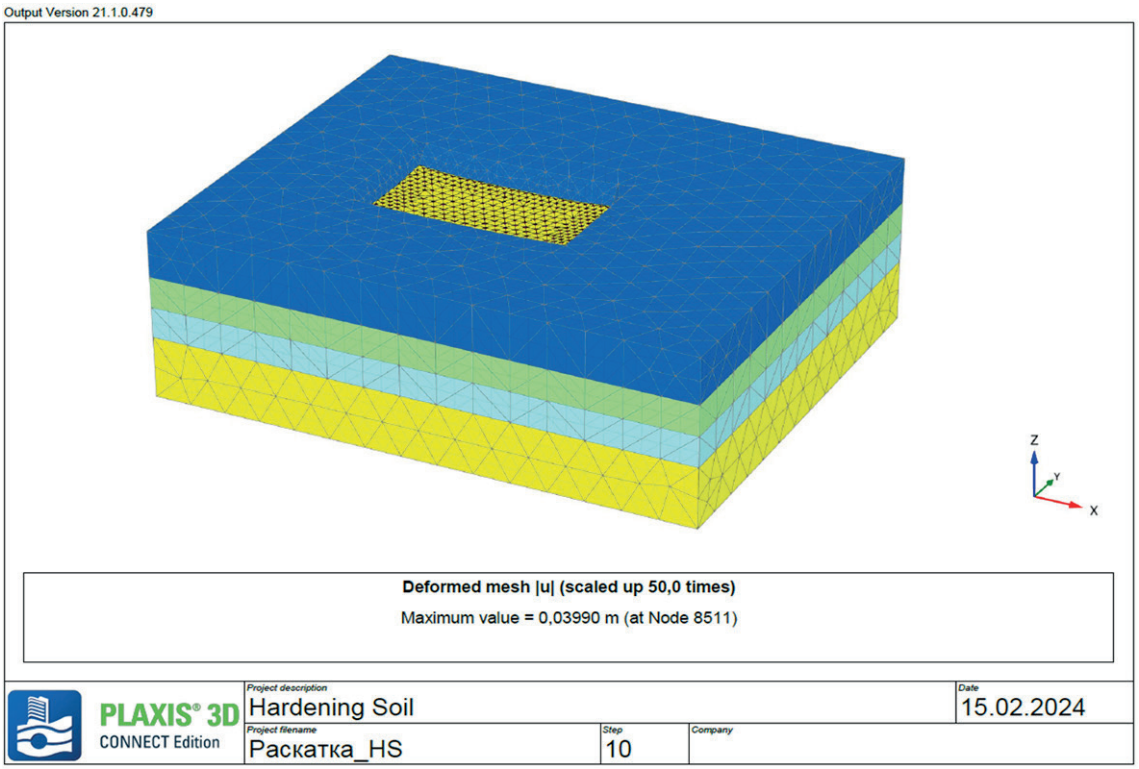


Fig. 6. Deformed scheme of the base (Hardening Soil)

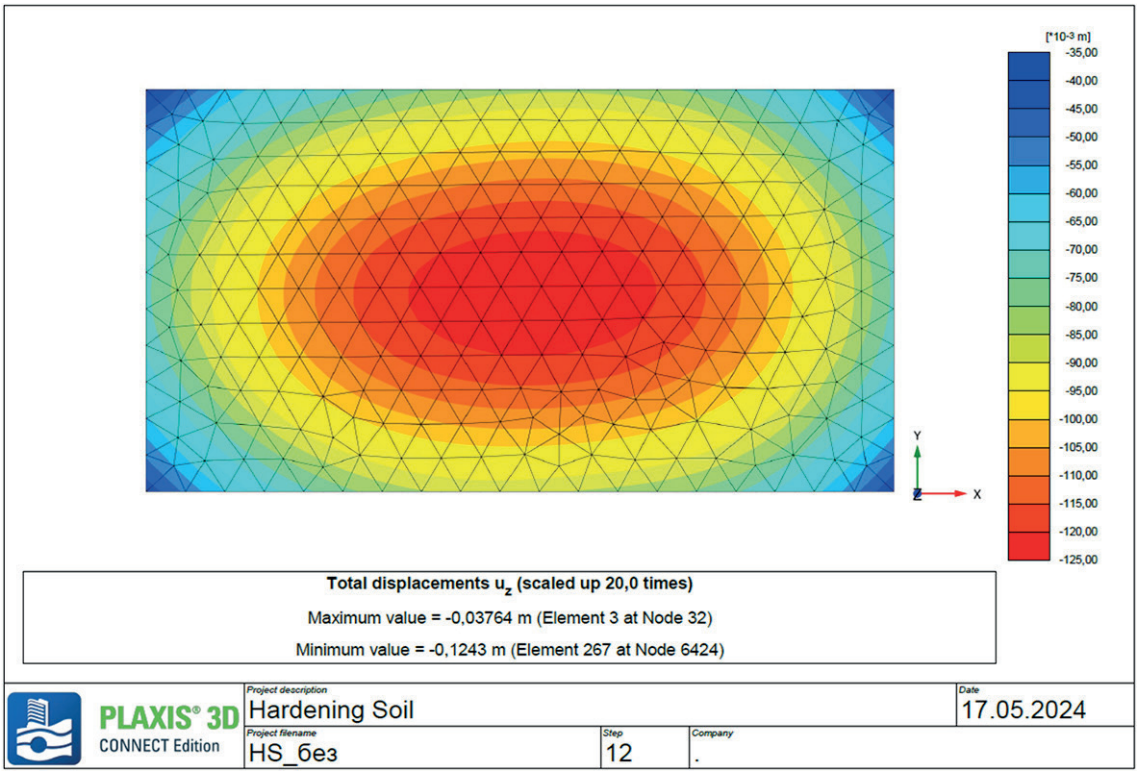


Fig. 7. Deformation of the foundation slab (max 124.3 mm)

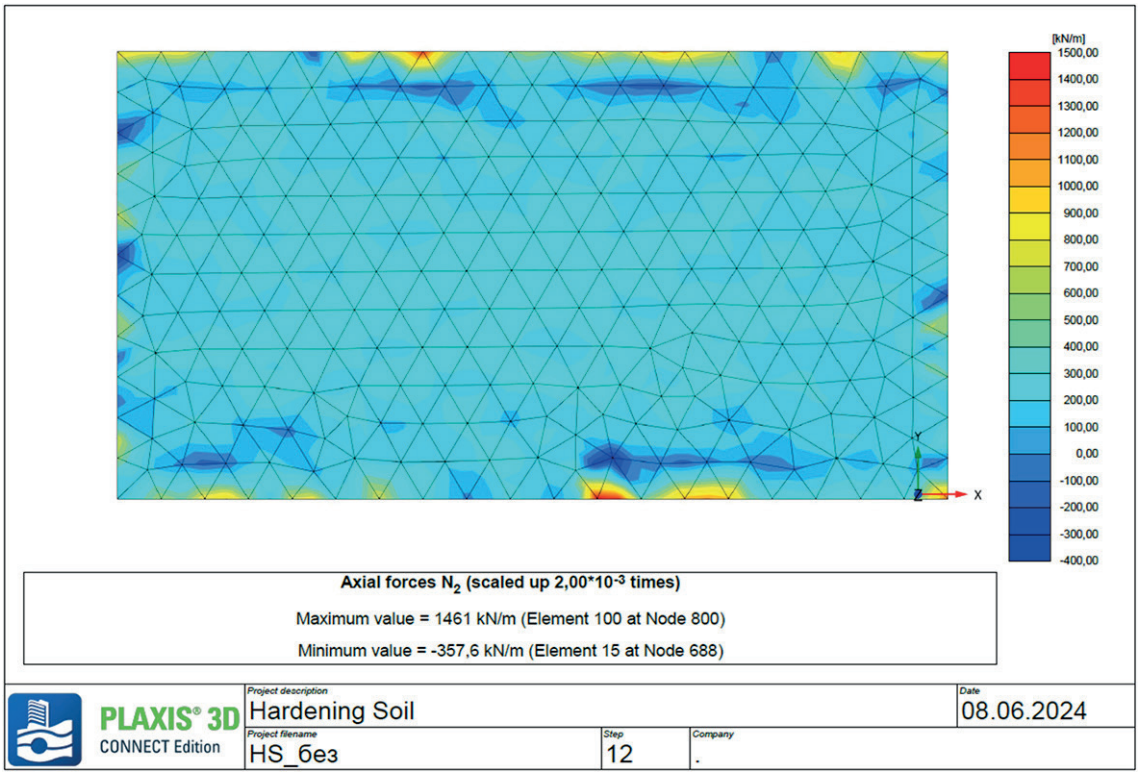


Fig 8. This is a figure. Schemes follow the same formatting

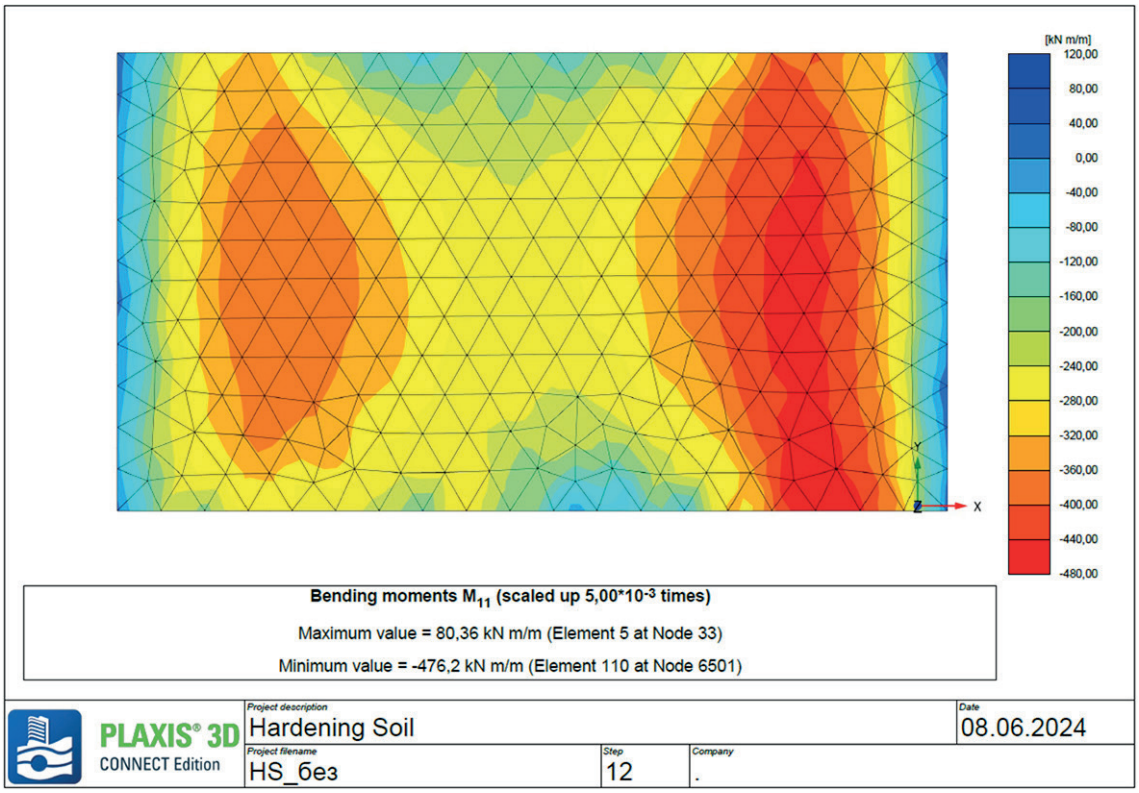


Fig. 9. The value of moment M, on slab foundation (max 476.2 kN/m)

The settlement of a large-size foundation slab on a nonlinearly deformable in-homogeneous base is nonlinearly load-dependent, which is in complete agreement with numerous theoretical and experimental data. The development of large deformations depends largely on plastic deformation, which can account for up to 50% of the final settlement.

The results of the foundation settlement from the applied load, shown in Figure 7, indicate that the deformation of the foundation slab exceeds the permissible values (65–100 mm). The calculation results suggest a problem with the foundation's bearing capacity in the soil layers below the foundation level, which is in complete agreement with numerous theoretical and experimental data. The development of large defor-mations depends largely on plastic deformation, which can account for up to 50% of the final settlement.

Design of base reinforcement and parameters of reinforcing elements.

Analysis of the study of geotechnical structures' stability shows that the purposeful inclusion of reinforcing materials in the soil increases the strength and reduces the deformability of the foundation, reducing the unevenness of the building settlement. The practice of designing the foundation base using vertical bar reinforcement has shown itself to be one of the effective methods of ensuring the stability of the slab foundation base.

The reinforced soil mass as a whole represents a composite system, which is characterized by the equivalent properties of the soil mass deformation modulus E2 and design resistance R2. In this model, the load from the building is redistributed across the entire mass of the stabilized soil, eliminating the occurrence of zones with increased stresses. An important advantage of this method is that, in essence, the designer constructs the base by creating the necessary physical and mechanical characteristics needed to address practical challenges.

The design standards recommend to consider the reinforced foundation as a transversal-isotropic medium and to calculate it according to two crucial groups of limit states: critical limit states and serviceability limit states.

In this case, the calculation of foundations is performed upon reaching the limit state by failure or excessive deformation of the foundation (GEO) from the condition (2):

$$\alpha R_2 + (1-\alpha)R_1 \geq P, \qquad S_{ar} \leq S_u, \qquad (2)$$

where $\alpha = V_{ar}/V_{gr}$ – coefficient characterizing the share of reinforcing elements in the volume of reinforced soil ((V_{ar}) – volume of reinforcing elements, (V_{gr}) – volume of soil);

R_1 – design resistance of unreinforced soil under the foundation footing, kPa;

R_2 – design resistance of reinforcement elements material under the condition of replacing natural soil with reinforcing soil, kPa;

P – average pressure under the foundation footing, kPa;

S_{ar} – settlement of the reinforced part of the foundation;

S_u – settlement of the reinforced part of the foundation.

The settlement of the reinforced part of the foundation (S_{ar}) is calculated by the layer-by-layer summation method using the formula (3):

$$S_{ar} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_{zp.i} * h_i}{E_3}, \qquad (3)$$

where h_i = design thickness of the i-th layer of soil within the compression zone of the reinforced foundation (m), which is taken as $h_i = 0.2 \cdot b$, where b is the width of the foundation;

n – number of layers into which the compressible thickness of the reinforced soil is divided;

$\sigma_{zp.i}$ – average value of additional vertical stress in the i-th reinforced layer, equal to the half-sum of the indicated stresses at the upper (Zi-1) and lower (Zi) boundaries of the layer along the vertical line passing through the centre of the foundation footing, kPa;

E_3 – modulus of deformation of reinforced soil in the direction perpendicular to the soil surface, kPa.

Deformation characteristics (E, E_3) should be determined experimentally and without experimental data – by approximate formulas (4).

$$E_3 = \alpha * E_{ap} + (1-\alpha)E_{uh}\ , \quad \frac{1}{E} = \frac{\alpha}{E_{fh}} + \frac{1-\alpha}{E_{uh}}, \qquad (4)$$

where E_{fh} = modulus of deformation of the reinforcing elements (kPa);

E_{uh} = modulus of deformation of the unreinforced soil (kPa).

When reinforcing the soil mass with vertical reinforcing elements capable of absorbing increased compressive stresses, reinforced concrete or concrete-soil vertical reinforcing elements should be used. The lengths of these elements should be determined within the compressible thickness of the soil.

The preliminary number of reinforcing elements and their length should be determined according to the formula (5):

$$N_d/n = F_d/\gamma_d, \qquad (5)$$

where N_d – design impact, kN;

n – number of reinforcing elements (vertical reinforcing elements);

γ_d – soil reliability coefficient;

F_d – bearing capacity of reinforcing elements (vertical reinforcing elements) by soil (material), kN.

In order to reduce the deformation of the slab foundation, we use the characteris-tics of the foundation reinforced with concrete reinforcement elements DSM, made of concrete C25/30. The characteristics of concrete reinforcement elements in the graphical form of the PLAXIS program are presented in Fig. 10.

In this case, when reinforcement is carried out under a slab foundation, the load from the overlying structures is transferred to the soil mass through the reinforcing elements due to friction forces. In the presented calculation model (Fig. 9), lateral compression and friction forces ensure the reinforcement element's operation in the soil. Through the contact surface with the soil or the slab foundation, the reinforcing element takes the load with its upper part and transfers it to the underlying layers with its lower part. The vertical concrete reinforcement elements absorb the compressive stresses (Fig. 11).

The stability analysis of the reinforced soil mass with DSM columns is modelled using Plaxis 3D software. It is preferable to use vertical reinforcing elements Ø300 mm

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		ение от собственного веса
Comments		
Colour		RGB 55, 255, 0
Material type		Elastic
Properties		
d	m	9,500
γ	kN/m³	25,00
Isotropic		☑
E_1	kN/m²	30,60E6
E_2	kN/m²	30,60E6
ν_{12}		0,1500
G_{12}	kN/m²	13,30E6
G_{13}	kN/m²	13,30E6
G_{23}	kN/m²	13,30E6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Prevent punching		☐

Fig. 10. Characteristics of concrete reinforcement elements (Concrete C25/30)

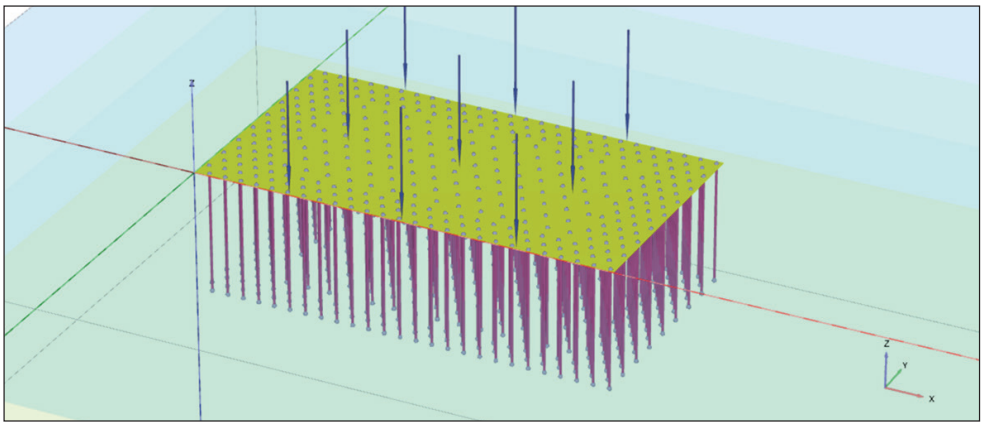


Fig. 11. Spatial model of the foundation slab on concrete reinforcement elements

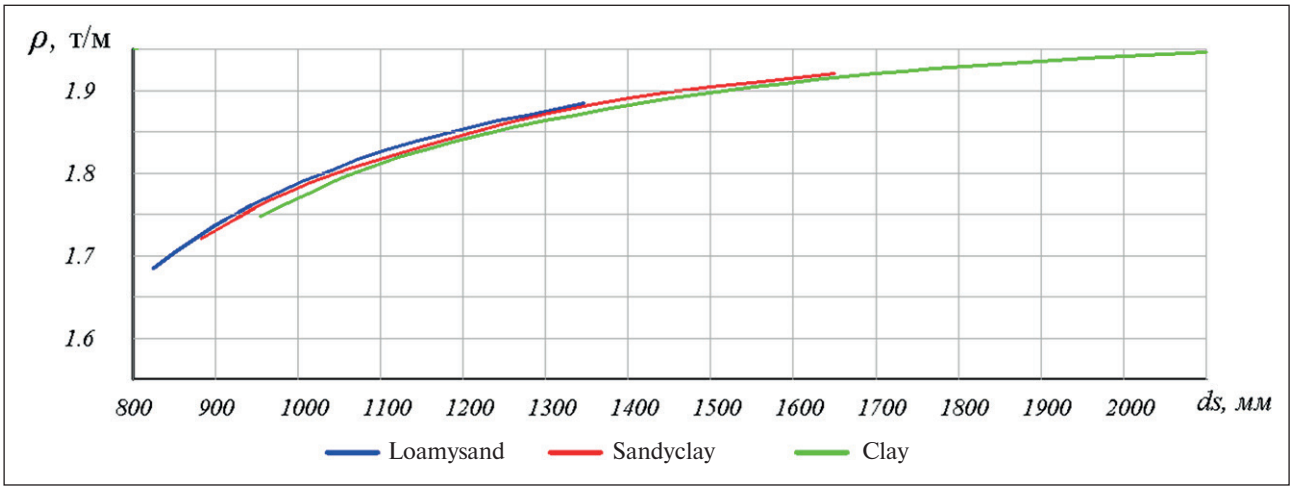


Fig 12. Dependence of the compressed zone diameteron the soil density

Table 2. Calculation parameters for the PLAXIS, taking into account the reinforcement of the foundation

Loading conditions	Average pressure (t/m²)	Vertical stiffness of the soil mass, t/m³
Static conditions (G+Q)	20.00	25.00

and length L = 2.5–5.5–9.50 m to achieve optimal results. The computational analysis is performed using the parameters given in Table 2. When analyzing the reinforced soil mass, the values of force, shear force and bending moment on the slab foundation were considered (Fig. 12, 13).

Problem statement

A key aspect of the analysis is modelling the stress-strain state of the foundation slab at different grid spacings, specifically between axes of 2×2, 3×3, and 5×5 meters. The reinforcing element's diameter is 300 mm, and its length is 9.5 m (at the depth of the compressible thickness).

The preliminary spacing of the reinforcing elements is determined from 7 to 11d of the reinforcing element diameter depending on the deformation modulus of the soil surrounding the reinforcing element or on the conditions of ensuring the joint opera-tion of the soil in the massif, as well as the required bearing capacity of the compacted base.

In this case, the distance between the well centres is determined by the formula (6):

$$i_{ck} = 0.95d\sqrt{\frac{\rho_{dc}}{\rho_{dc}-\rho_d}}, \quad (6)$$

where ρ_d – density of dry soil of natural composition, t/m³;

p_{ds} – average density of dry soil in compacted mass, t/m³.

When drilling the borehole with a reamer, the soil zone around the borehole is compacted to a specific diameter.

For preliminary calculations, the diameter of the compacted zone (d_s), which can be obtained after rolling, is determined by the formula (7):

$$d_S = \gamma_c\, d\sqrt{\rho_{ds}/(\rho_{ds}-\rho_d)}, \quad (7)$$

where d – is the diameter of the borehole, m.

The preliminary calculation of the diameter of the compacted zone for the site's soil (Fig. 12) for loam

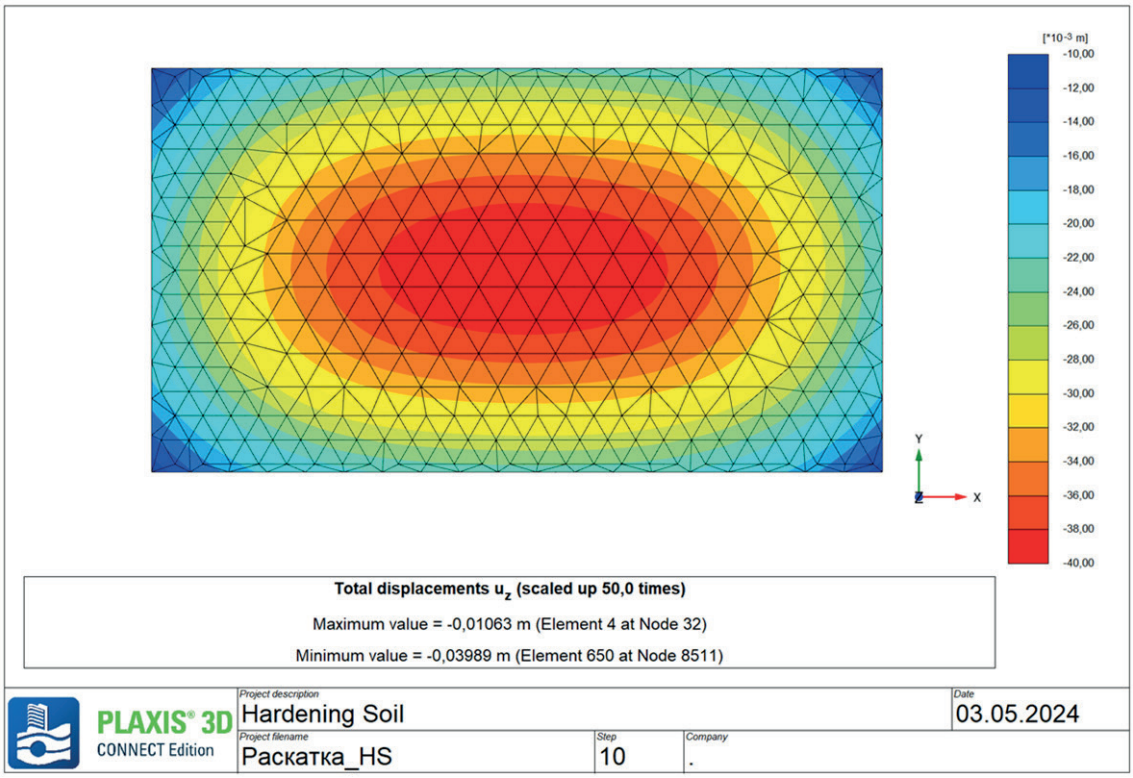


Fig. 13. Deformation of the foundation slab, reinforcement spacing 2x2 m, pile length 9.5m (max 39.9 mm)

ρ_d = 1,88 t/m3 is d_s = 1.34 m, and the distance between the centers of the wells is i_{ck} = 2.33 m.

Therefore, according to constructive requirements (i_{ck} = 7 to 11d) and based on the calculation of the minimum size of the distance between the centers of the wells, we take 2×2 m.

For the final selection of the rational option of spacing the centers of reinforcement elements for this building, it was decided to analyze the results of bending moments and deformation in the foundation slab (Figures 13–18). The quantification of the results is presented in Table 3.

Table 3 shows that the value of bending moments and deformation of the foundation slab increases with increasing distance between the reinforcing elements. At a spacing of 2×2 m, obtaining the minimum values of deformation and bending moments is associated with ensuring the foundation's stiffness by increasing the foundation's density with reinforcing elements. With the increase in the distance between the centers of the compacted zone to 5 m due to the increase of settlement in the compaction phase and shifts between the reinforcing elements, the value of bending moment and deformation in the foundation slab increased two times. The obtained values allowed us to identify the optimal parameters of the reinforcing element design.

Problem statement: Modelling of the stress-strain state of the foundation slab at different lengths of the re-

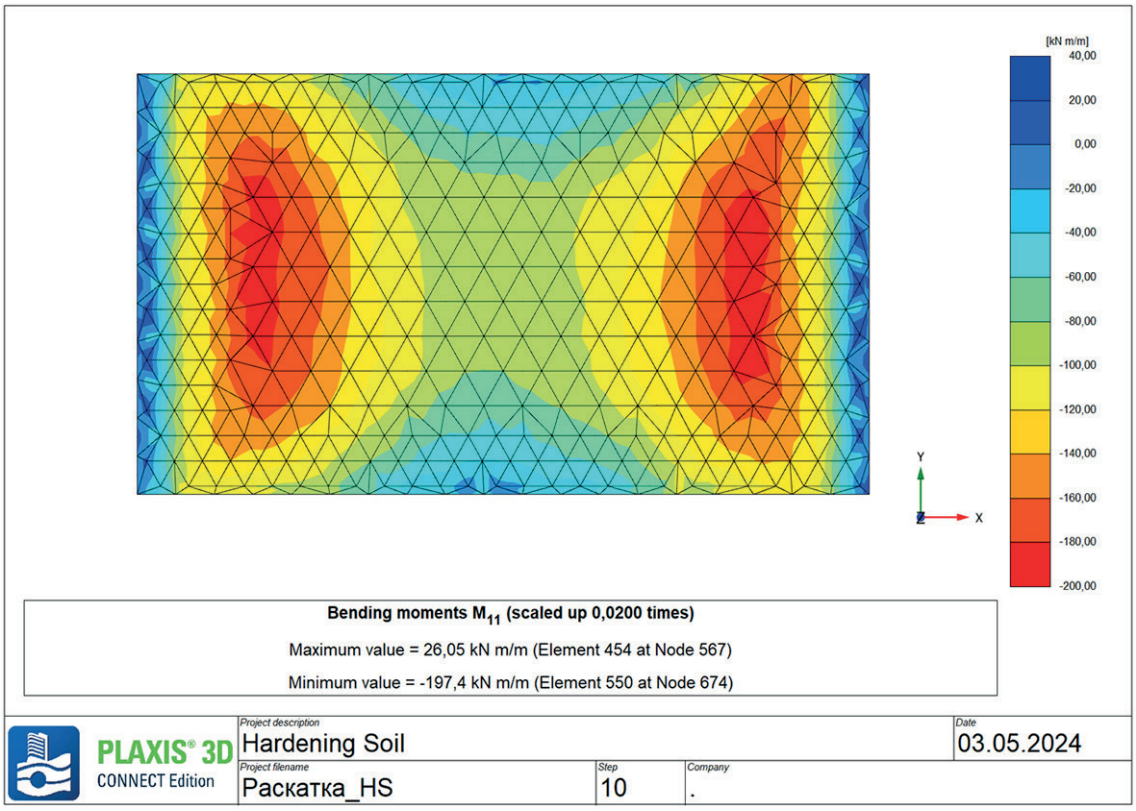


Fig. 14. Moment of foundation slab, spacing of reinforcing element 2x2 m, length of reinforcing element 9.5 m (max 197.4 kN/m/m)

Table 3. Values of bending moments and deformation of the foundation slab as a function of the distance between reinforcing elements

The mesh between reinforcing elements, m	Bending moment, KN/ m²,	Deformation of the foundation slab, mm
Without reinforcing element	476.2	124.3
2×2	197.4	39.9
3×3	263.1	48.04
5×5	385.4	62.6

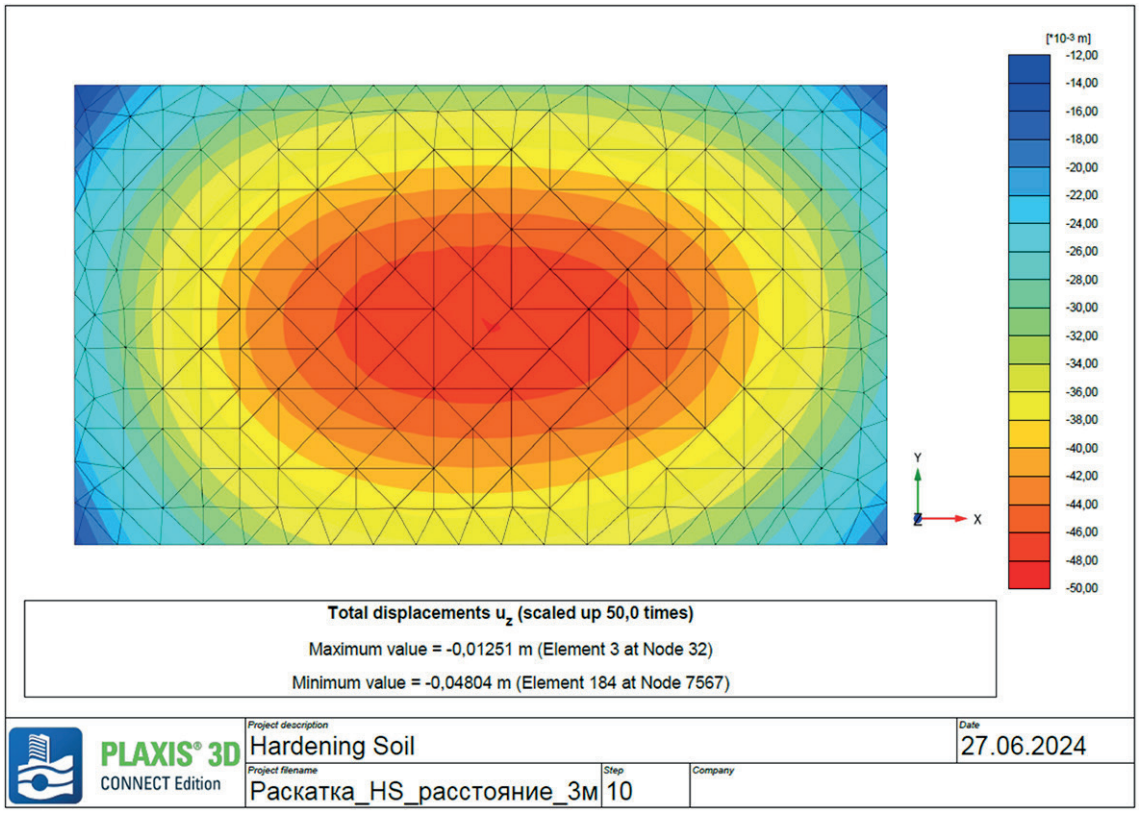


Fig. 15. Deformation of the foundation slab, reinforcement spacing 3x3m, reinforcement length 9.5 m (max 48.04 mm)

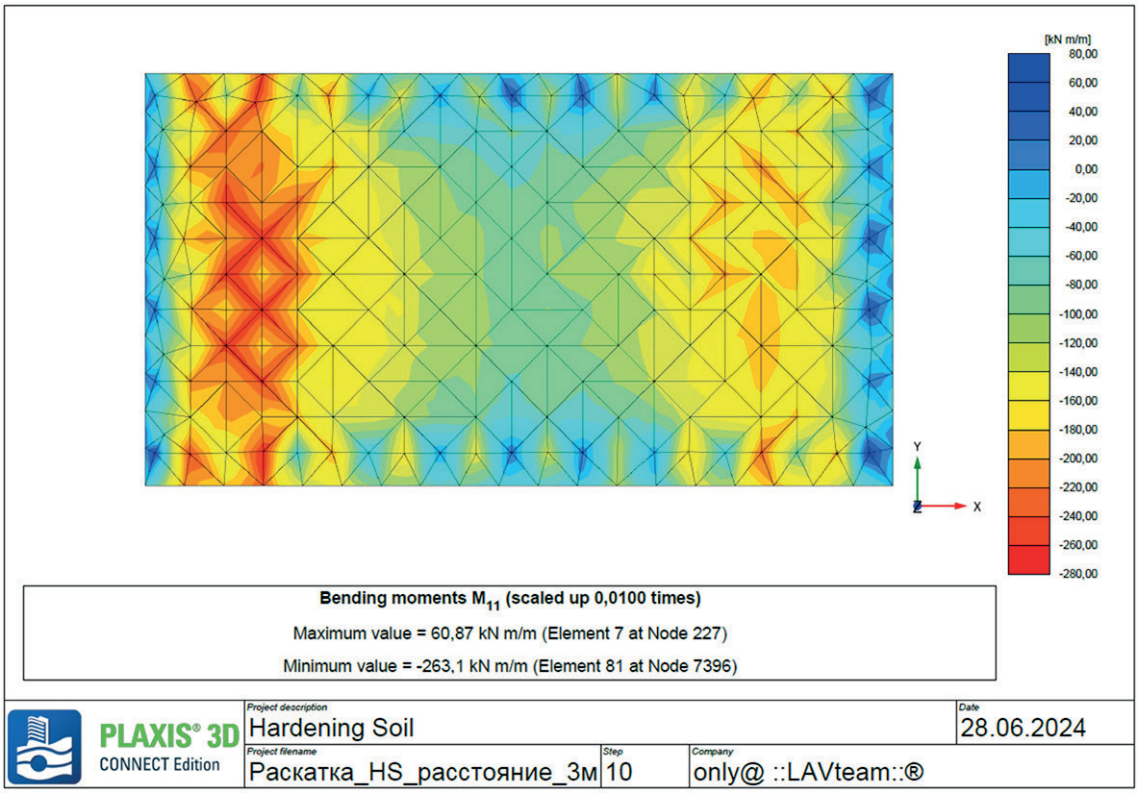


Fig. 16. Moment of foundation slab, reinforcement spacing 3x3 m, reinforcement length 9.5 m (max 263.1 kN/m/m)

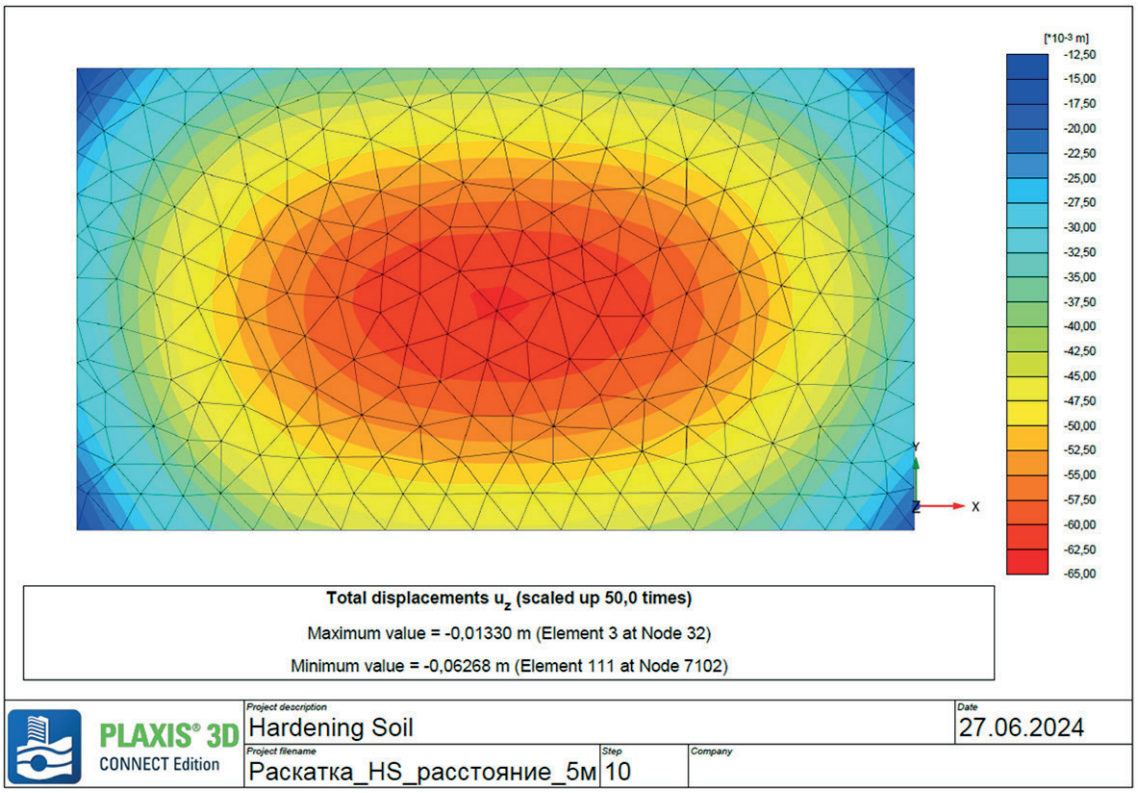


Fig. 17. Deformation of the foundation slab, reinforcement spacing 5x5 m, reinforcement length 9.5 m (max 62.6 mm)

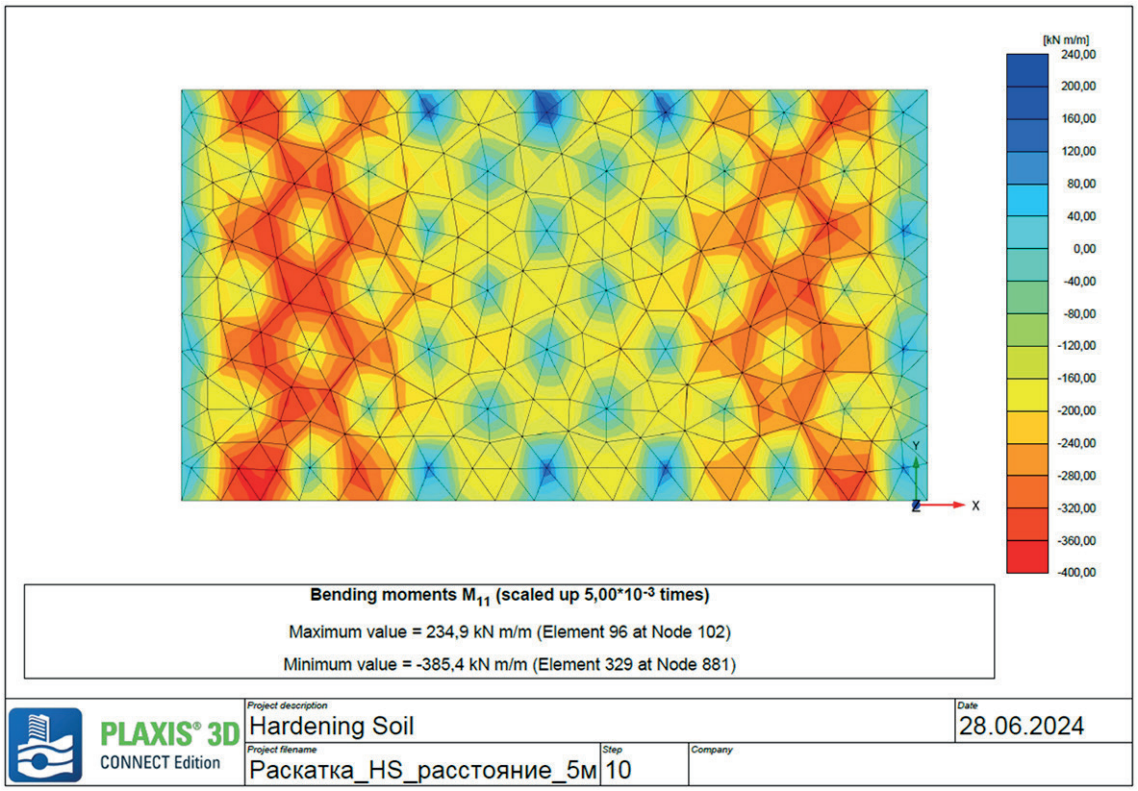


Fig. 18. Moment of foundation slab, reinforcement spacing 5x5 m, reinforcement length 9.5 m (max 385.4 kN/m/m)

inforcing element: L = 2.5 m, L = 5.5 m, L = 9.50 m. The diameter of the reinforcing element is 300 mm. The optimum spacing between the centers of the compacted zone was chosen to be 2×2 m.

For the final selection of the rational option of the reinforcement element length for this building, it was decided to analyze the results of bending moments and de-formation in the foundation slab (Figures 19–24). The quantification of the results is presented in Table 4.

As shown in Figure 25, as the length of the reinforcement element decreases, the foundation's settlement increases and the foundation slab's deformation increases. At small lengths of 2.5–5.5 m, within the compressible thickness, the reinforcing element and the surrounding soil work according to the principle of the method of equal deformations, the value of settlement depends on their components [32]. Experts also recommend that the equivalent modulus of deformation of the reinforced soil should be considered when evaluating the practical characteristics of the soil mass reinforced with reinforcing elements [33–34]. As the length of the reinforcing element increases, the value of the equivalent modulus of deformation of the reinforced soil increases, effectively reducing the settlement of the reinforced foundation. Increasing the length of the reinforcing element from 2.5 m to 9.5 m reduced the foundation slab deformation by three times and reduced the bending moment by 60% (Table 4).

As a result, the structural solution of the vertically reinforced slab foundation of a multi-storey building: spacing between reinforcing elements 2×2 m, length – 9.5 m, diameter – 300 mm, material – concrete B25. At the same time, the maximum calculated settlement of the slab foundation is S = 3.99 cm. According to the normative documentation for multi-storey buildings with

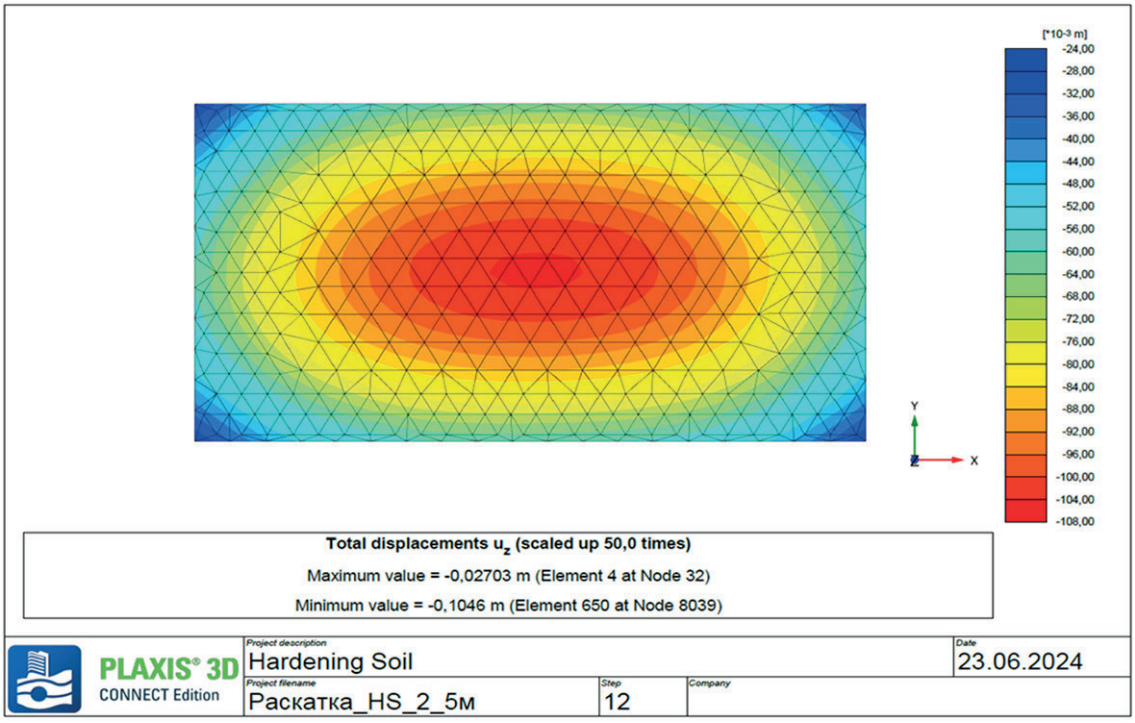


Fig. 19. Deformation of the foundation slab, reinforcement length 2.5 m, (max 104.6 mm)

Table 4. Values of bending moments and deformation of the foundation slab from the length of the reinforcing element

Length of reinforcing element, m	Bending moment, KN/m,	Deformation of the foundation slab, mm
Without reinforcing element	476.2	124.3
2.5	430.2	104.6
5.5	268.9	59.81
9.5	197.4	39.9

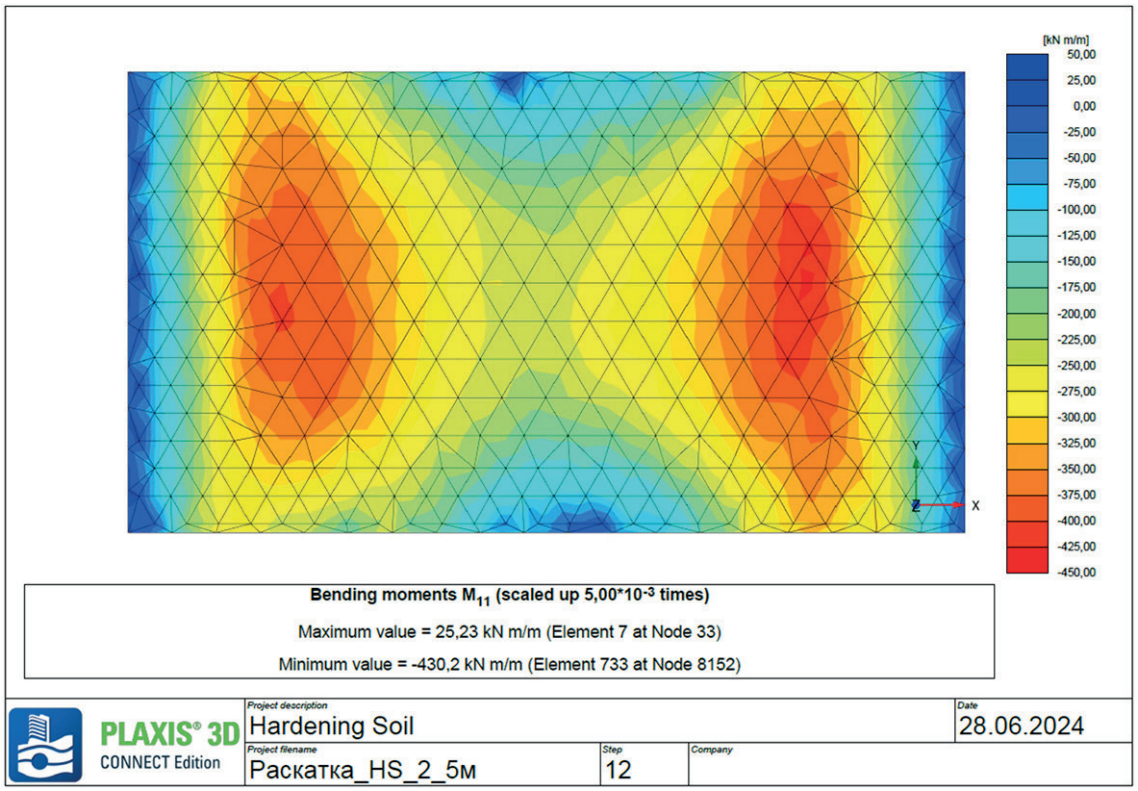


Fig. 20. Deformation of the foundation slab, reinforcement length 5.5 m (max 59.81 mm)

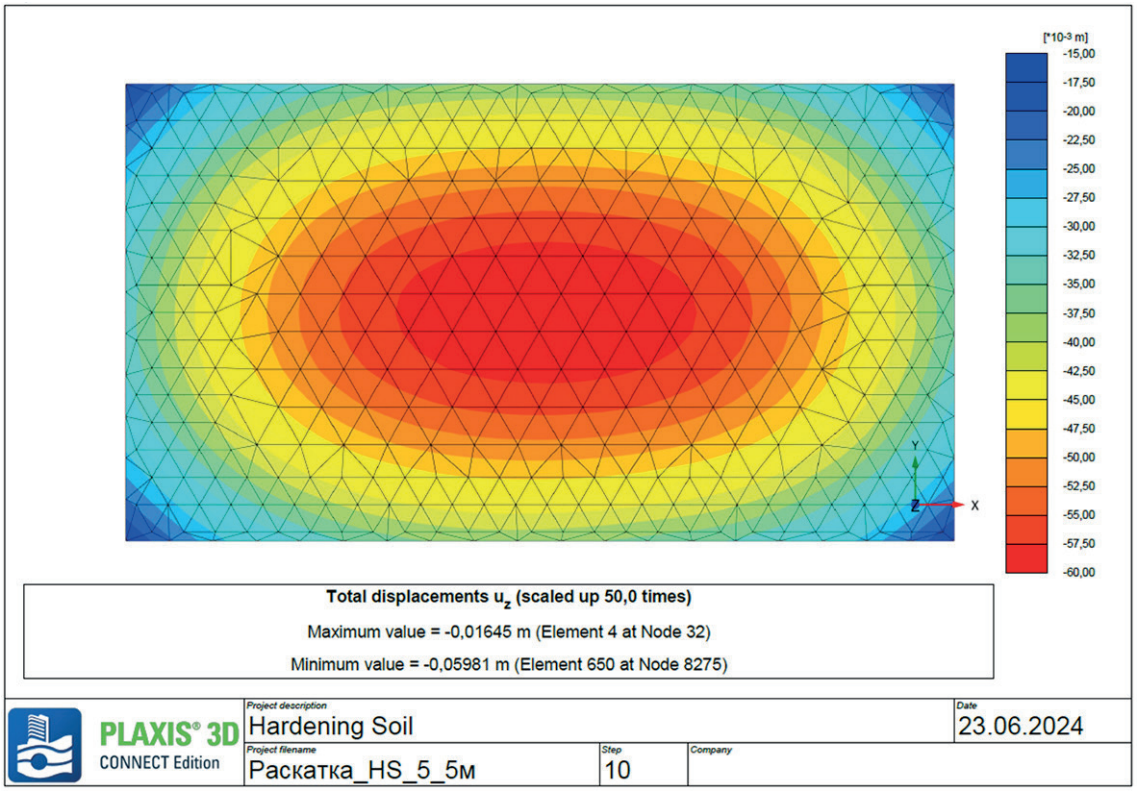


Fig. 21. Deformation of the foundation slab, reinforcement length 5.5 m (max 59.81 mm)

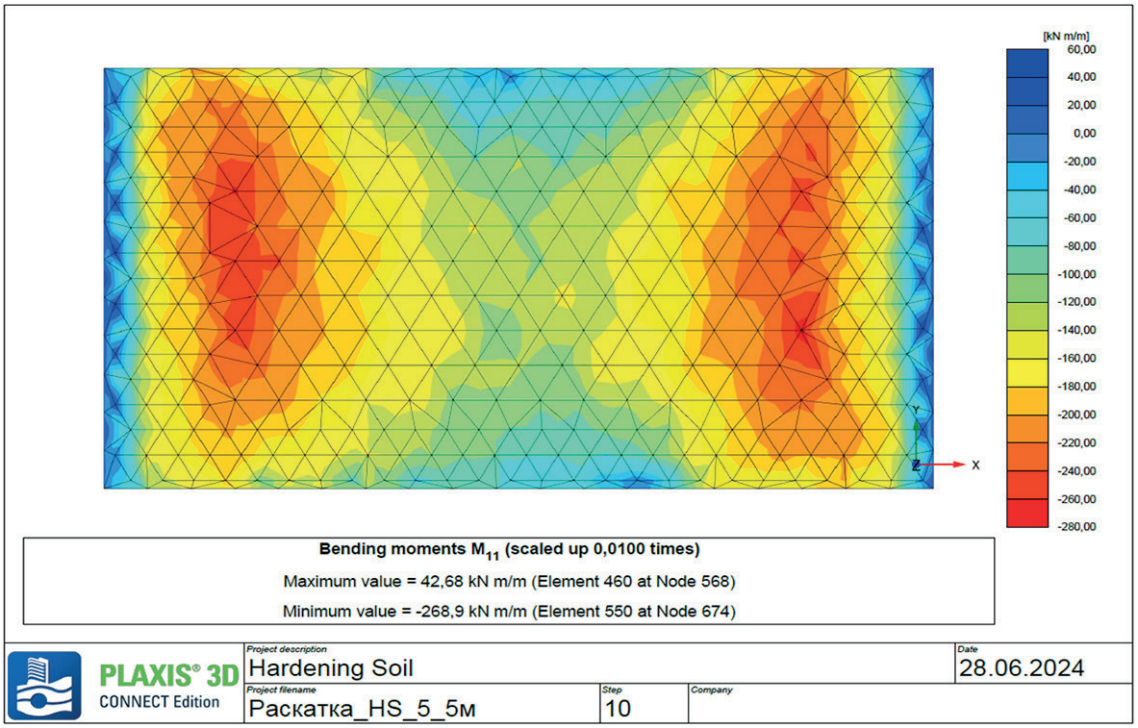


Fig. 22. Foundation slab moment, reinforcement length 5.5 m (max 268.9 kN/m/m)

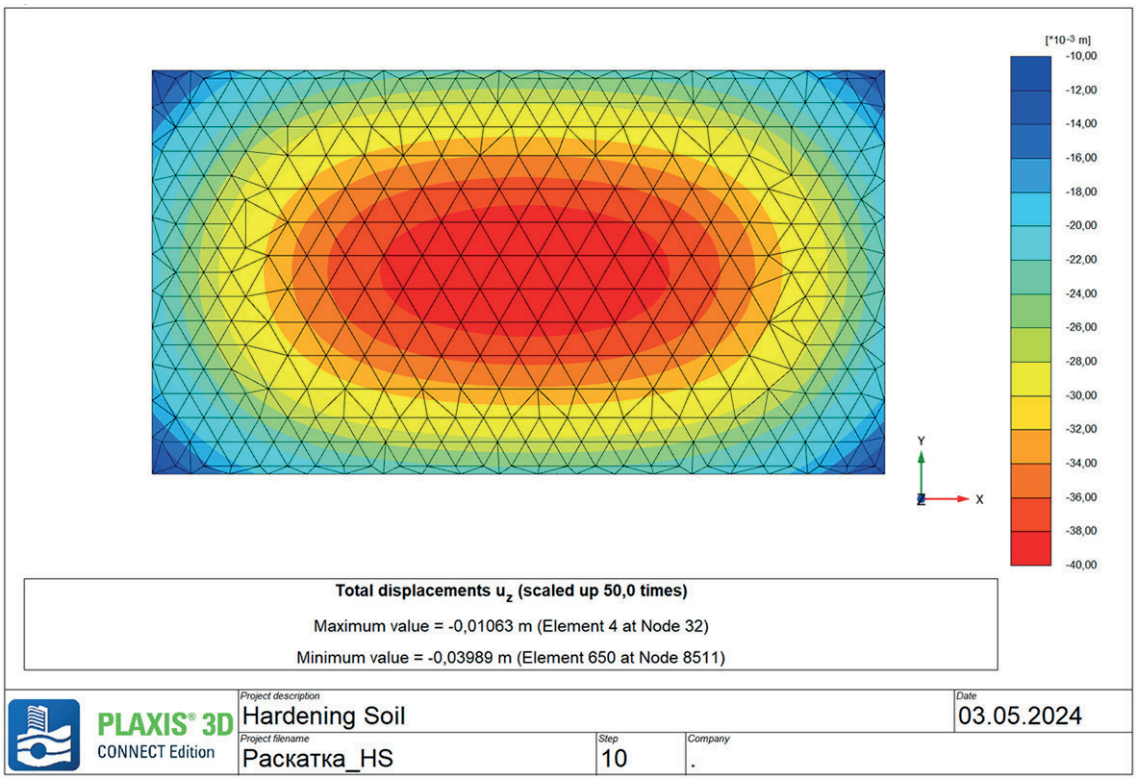


Fig. 23. Schemes follow the same formatting

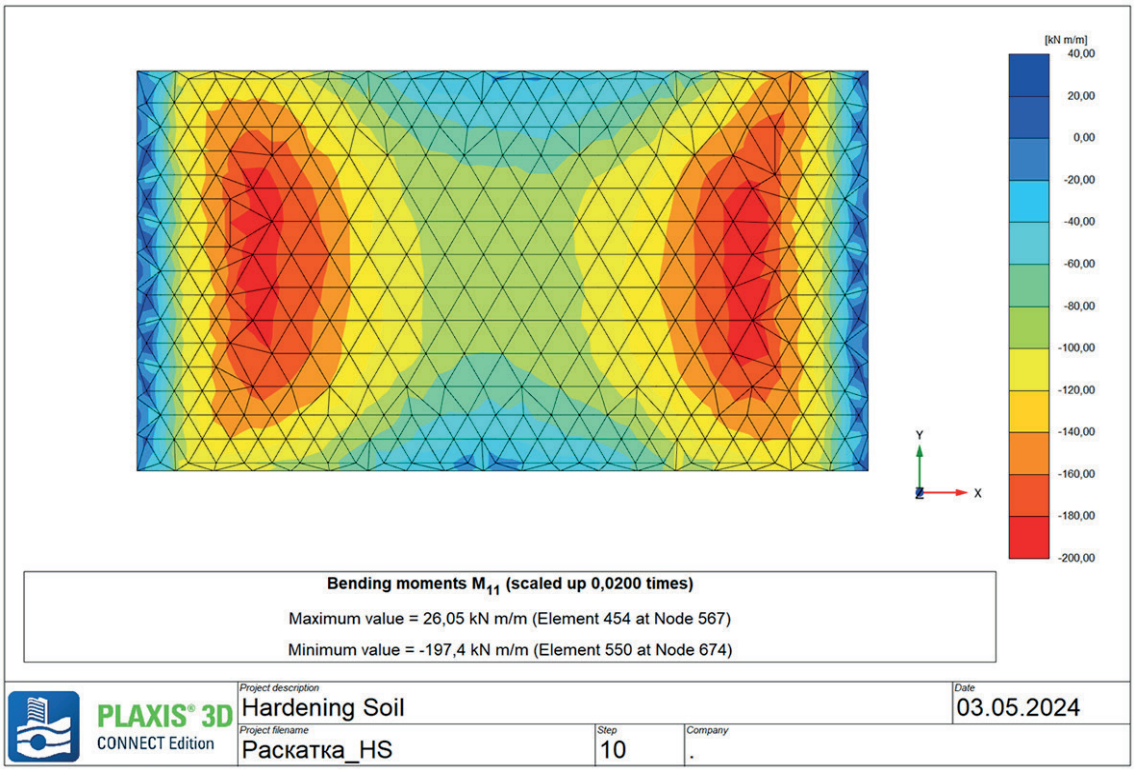


Fig. 24. Foundation. Moment M length of reinforcing element 9.5 m (max 197.4 kN/m/m)

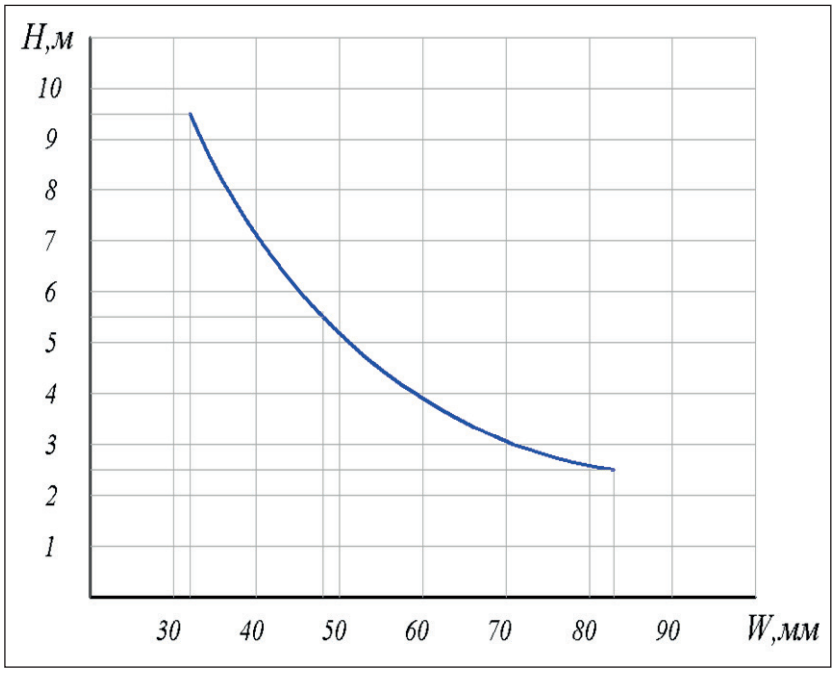


Fig. 25. Graph of the dependence of the slab deformation on the length of the reinforcing element

a fully reinforced concrete frame, the foundation's limit deformation in settlement is 15 cm. For buildings with foundations in solid slabs, the limit values of average settlements can grow by a factor of 1.5: [S] = 3.99 cm–1.5 = 5.99 cm. Since the maximum design settlement of the slab foundation S = 3.99 cm is less than the limit value of the average settlement [S] = 3.99 cm–1.5 = 5.99 cm, the calculation of the foundation deformations of the slab foundation has been performed successfully.

Increasing the bearing capacity of the foundation is also connected with the process of borehole creation by drilling with a special drilling tip and rolling out. The

essence is the compaction of the borehole wall with the drill bit during the drilling process. Here, it is essential to consider the increase of soil density around the borehole wall by two times, which effectively affects the resistance of the pile shaft due to lateral friction. Here, it is also necessary to consider the exclusion of the technological gap during the technological pile sinking.

CONCLUSION

The use of rolling equipment in constructing bored vertically reinforcing elements is a promising and reliable method of ensuring the bearing capacity and deformability of the foundation. During rolling, a compacted zone with a diameter larger than the size of the reinforcing element is created, increasing the soil stiffness in the in-ter-element space, which greatly increases the bearing capacity of the foundation.

Reinforcement of the soil foundation with concrete cast-in-place piles enabled to increase the bearing capacity of the foundation and reduce deformability by three times.

The analysis of the stability of geotechnical structures shows that targeted inclusion of reinforcing materials in the soil increases strength, reduces deformability of the foundation, and reduces uneven settlement of the building.

In the presented calculated model, the work of the reinforcement element in the soil is provided by lateral compression and friction forces.

The prospect of further experiments will be to investigate the spatial performance of the system 'reinforcing element – interelement soil space' to determine the optimal design solutions for massif reinforcement.

1. The calculation and experimental studies conducted made it possible to substantiate the effectiveness of using reinforced foundations on highly compressible soils, with the formation of rigid reinforcing elements with specified geometric dimensions and physical, mechanical, and deformation characteristics.

2. The study established that reinforcing the base of a slab foundation effectively is ensured by installing a soil cushion (distribution layer) of sandy or gravelly soil thinner than the slab part of the foundation.

3. The calculation results reveal that the design solution for the vertically reinforced base of the slab foundation, specifically the spacing, diameter, and length of the reinforcing elements, must be determined based on the engineering and geological circumstances of the construction site.

4. Calculation and experimental studies have revealed the dependence of the length and spacing of reinforcing elements on the depth of the compressible thickness of the weak soil massif. At small lengths of reinforcing elements within the compressi-ble thickness, foundation deformations exceeding the permissible limits are observed. Also, increasing the spacing of reinforcement elements leads to increased deformation in the foundation slab.

5. The research findings on vertically reinforcing components on a tangible object allowed for a threefold reduction in deformability and an increase in the bearing capacity of the foundation, which greatly reduced the time and expense involved in building artificial foundations.

6. However, it should be noted that the lack of consideration of soil plastic properties in the space between the reinforcing elements allows only a qualitative assessment to identify the need for changes in the design of slab foundations to exclude zones of highstress concentrations.

REFERENCES

1. Usmanov R., Mrdak I., Vatin N., Murgul V. Reinforced soil beds on weak soils. *Applied Mechanics and Materials.* 2014;633-644:932-935. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM. 633-634.932

2. Yushchube S.V. Podshivalov I.I. Stress-strain state model of split-level foundation of multi-storey building on a slope. *Journal of Construction and Architecture*. 2023;25(5): 164–178.

3. Kryzhanovskiy A.L., Rubtsov O.I. Reliability of design solutions of foundation slabs of high-rise buildings. *Vestnik MGSU*. 2006;1:191–198.

4. Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Stress-strain state finite element modeling of concrete foundation of a multistory brick building. *Journal of Construction and Architecture.*2021;23(2):118–132.

5. Katzenbach R., Schmitt A., Ramm H. Basic principles of design and monitoring of high-rise buildings of Frankfurt am Main. *Urban reconstruction and geotechnical construction*. 2005;9:80–99.

6. CN PK EN 1997-2:2007/2011. GEOTECHNICAL DESIGN. Part 2. Ground investigation and testing. February 2009.

7. State standards in the field of architecture, urban planning and construction. Regulatory and technical manual of the republic of Kazakhstan Designing and arrangement of foundation reinforcement with vertical reinforcing elements. NTP RK 07-01.3-2011. Astana 2015.

8. Alani A.M., Aboutalebi M. Analysis of the subgrade stiffness effect on the behaviour of ground-supported concrete slabs. *Structural Concrete*. 2012; 2(13):102-108. https://doi.org/10.1002/suco.201100043

9. Simões J., Neves L., Armando A., Guerra N. Reliability assessment of shallow foundations on undrained soils considering soil spatial variability. *Computers and Geotechnics.* 2020;119:103369. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103369

10. Mangushev R.A., Nguyen K.H. Comparisons of the calculation of the precipitation of buildings by various methods in the presence of layers of weak soils at the base. *Vestnik MGSU.* 2008;119-123.

11. Marinichev M.B., Tkachev I. G. Development of constructive solutions vertical reinforced bases of slab foundation of high-rise buildings in seismic areas. *Journal construction and architecture.* 2016;4:37–44.

12. Makovetsky O. A. *Calculation and construction of an artificial foundation "structural geotechnical array"*. Doctor of Science. Russian University of Transport; 2021.

13. Popov A.O. Settlement calculation of clay bed reinforced with vertical elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2015;4:19–27.

14. Semet C. Comparison of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models' Numerical Estimation of Ground Surface Settlement Caused by Tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*. 2017;4:95-102.

15. Madhira R. M., Hormoz B. P. A new model for geosynthetic reinforced soil. *Computers and Geotechnics*. 1988;6:277-290.

16. Lina J., Yehya T., Fadi H.C., Yasser E. Effect of Soil - Structure Interaction Constitutive Models on Dynamic Response of Multi-Story Buildings. *Journal of Engineering Science and Technology.* 2018;11:56-60.

17. Bessimbayev Y., Zhambakina Z., Niyetbay S. Ensuring the seismic resistance of a building using a geotechnical seismic insulating screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022; 3. https://doi:10.15587/1729-4061.2022.260035

18. Amjad H.B., Shahnawaz Z., Ghulam S.B., Muhammad A.Z., Riaz B., Bashir A.M., Muhammad M.B. Mohr-Coulomb and Hardening Soil Model Comparison of the Settlement of an Embankment Dam. Engineering. *Technology & Applied Science Research*. 2019;9:4654-4658.

19. Golubev A.I., Selection of soil model and its parameters in calculations of geotechnical objects. *Proceedings of the International Conference on Geotechnics, Geotechnical problems of megacities. GEOMOS 7-10 June*. 2010;5:1727–1732.

20. Bessimbayev Y.T., Niyetbay S.E., Awwad T., Kuldeyev E.I., Uderbayev S.S., Zhumadilova Z.O., Zhambakina Z.M. The Creation of Geotechnical Seismic Isolation from Materials with Damping Properties for the Protection of Architectural Monuments. *Buildings.* 2024;14:1572. https://doi.org/10.3390/buildings14061572

21. Fenton G., Naghibi F., Griffiths D. On a unified theory for reliability-based geotechnical design. Computers and Geotechnics., September 2016;78:110-122. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X16300866

22. Cajka, R., Marcalikova, Z., Bilek, V., Sucharda, O. Numerical Modeling and Analysis of Concrete Slabs in Interaction with Subsoil. *Sustainability.* 2020;12(23): 9868. https://doi.org/10.3390/su12239868

23. Acharya M., Acharya I. Reliability Analysis of Bearing Capacity of Shallow Foundation on c- φ Soil. *Journal of Advanced College of Engineering and Management.* 2019;12:71-78. https://www.nepjol.info/index.php/JACEM/article/view/26690

24. Soubra A., Massih D.Y. Reliability-Based Analysis and Design of Foundations Resting on a Spatially Random Soil. *Publication: GeoCongress*.2008; Jun 20; 2012. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40971(310)10

25. Benramdane Y., Blom J., Ghalandari M. To what extent do software programs comply with Eurocode 7 with regard to the bearing capacity of strip foundations. University of Antwerp, Faculty of Applied Engineering, *EMIB Research Group, Groenenborgerlaan* 171, B-2020 Antwerp. https://data.fine.cz/handbooks-chapter-pdf/software-programs-comply- eurocode7-bearing-capacity-strip-foundations.pdf

26. Xue J., Nag D. Reliability analysis of shallow foundations subjected to varied inclined loads. Geotechnical Safety and Risk. ISGSR 2011. Karlsruhe: *Bundesanstalt für Wasserbau*. 2011;377-384. https://hdl.handle.net/20.500.11970/99587

27. Degtyarev V. G., Safronova T. I., Kozhenko N. V., Molotkov G S. Engineering method for calculating the slab foundation of a high-rise building in difficult geological conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;698(2)022014. https://doi:1010.1088/1757-899X/698/2/022014

28. Samorodov A.V., Nikulin V.B., Krotov O.V., Khrapatova I.V. Stress-strain analysis the condition of the pile-slab foundation a multi-storey building using sofistik software package. *Kharkiv National University of Construction and Architectur*e. Kharkiv, Ukraine. https://pssbim.ru/files/lists/News/759_UseFiles_1476358999_Analiz-NDS-svayno-plitnogo-fundamenta-mnogoetazhnogo-zdaniya-s-pomoschyu-PK-SOFiSTiKdoc.pdf

29. Gilemkhanov R.A., Alisher A. Assessment of the stress-strain state of the foundation plate, taking into account karst failures in the SCAD Office environment. *Construction of unique buildings and structures*. 2016;4(43):18-33.

30. Batalov S.N. Kulikov R.G. Salmin I.A. Determination of the sediment of the foundation plate in GeoPlate *Pro. Scientific, Technical and Industrial Journal of Construction*. 2019;11:10.

31. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. The results of modeling the stress-strain state of an adjustable foundation and a soil foundation in the ansys workbench software package. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*, 2015; 4:76-88.

32. Ter-Martirosyan Z.G., Strunin P.V. Strengthening weak soils in the basis of foundation slabs with use of technology of jet grouting. *Bulletin MGSU*. 2010; 4:310-83158.

33. Kuanyshbay A., Niyetbay S., Tashmukhanbetova I., Sadyrov R., Amangeldi N., Mustafa L., Nurakhova A., Rustemov I., Yesbolat A. Optimized Development of High-Porosity Structural and Thermal Insulation Foam Ceramics Based on Local *Natural and Technogenic Raw Materials. Ceramics*. 2025,8:35. https://doi:10.3390/ceramics8020035

34. Mirsayapov I.T., Mustakimov V.R. Investigation of the strength and deformability of subsidence soil bases reinforced with vertical elements. "Interaction of structures and foundations: calculation methods and engineering practice": *Proceedings of the International Conference on Geotechnics*. Volume 2. St. Petersburg State University. 2005;40-45.

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kanat T. Alenov – PhD doctoral student, Institute of Engineering and Technology, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, Alenov@korkyt.kz, https://orcid.org/0009-0007-4907-8027

Yerik T. Bessimbayev – Doctor of Technical Sciences, Institute of Architecture and Civil Engineering, Construction and Building Materials Department, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, y.bessimbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-0869-3513

Kylyshbay A. Bissenov – Doctor of Technical Sciences, Doctor of Technical Sciences, Kyzylorda Open University, Kyzylorda, Kazakhstan, Bisenov_KA@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0167-3560

Assylbek S. Shadkam – PhD doctoral student, Institute of Architecture and Civil Engineering, Construction and Building Materials Department, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, Asylbekshadkam@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5759-0337

Sayat E. Niyetbay – PhD, Department of Industrial and Civil Engineering, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, s.nietbay@mok.kz, https://orcid.org/0000-0002-9748-6830

Zhangazy N. Moldamuratov – PhD, Research Professor at the Faculty of General Construction, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, Associate professor at the Higher School of Advanced Digital Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, zhanga_m_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4573-1179

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Kanat T. Alenov – writing an article, scientific editing of the text, identification of dependencies, conducting the experimental part of the study.

Yerik T. Bessimbayev – scientific guidance, research concept, development of methodology, scientific text editing, final conclusions.

Kylyshbay A. Bissenov – preparation of samples, writing an article, processing of experimental data, accumulation of material.

Assylbek S. Shadkam – preparation of samples, writing an article, processing of experimental data, accumulation of material.

Sayat E. Niyetbay – conducting a literary review, conducting the experimental part of the study.

Zhangazy N. Moldamuratov – conducting a literary review, conducting the experimental part of the study.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 08.04.2025; accepted for publication 12.04.2025.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Научная статья / Original article
УДК 692.115
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-151-172

CC BY 4.0

Моделирование и оценка эффективности вертикально армированного основания плитного фундамента многоэтажного здания

Канат Табынович Аленов[1], **Ерик Турашович Бесимбаев**[2], **Кылышбай Алдабергенович Бисенов**[1, 3], **Асылбек Сафаралиулы Шадкам**[2], **Саят Ержанулы Ниетбай**[2, 4*], **Жангазы Нуржанович Молдамуратов**[4, 5*]

[1] Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан
[2] Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
[3] Кызылординский открытый университет, Кызылорда, Казахстан
[4] Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан
[5] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью данного исследования является оценка конструкционного поведения и эффективности плитных фундаментов, армированных вертикальными элементами — метода, который все чаще применяется в гражданском строительстве для повышения надежности фундаментов на слабых и сильно сжимаемых грунтах. Традиционные плитные фундаменты часто подвержены чрезмерным осадкам и обладают низкой несущей способностью, особенно при воздействии высоких нагрузок от многоэтажных зданий. Армирование основания грунта представляет собой эффективное решение этих проблем за счет повышения жесткости и снижения деформаций. **Методы и материалы.** Исследование основано на численном моделировании с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном обеспечении PLAXIS 3D, с применением модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil) в соответствии с требованиями Еврокода 7. В качестве объекта моделирования рассматривалось 9-этажное здание с монолитным плитным фундаментом, для которого анализировались различные конфигурации вертикальных армирующих элементов. Основные варьируемые параметры в моделировании включали шаг (2×2 м, 3×3 м и 5×5 м) и длину (2,5 м, 5,5 м и 9,5 м) армирующих элементов. Свойства грунтов были получены по результатам инженерно-геологических изысканий. **Результаты и обсуждение.** Анализ показал, что армирование плитного фундамента позволило значительно снизить деформации (в 3 раза) и изгибающие моменты (до 60%) по сравнению с неармированным случаем. Наиболее эффективной конфигурацией признаны бетонные элементы длиной 9,5 м с шагом 2×2 м. Применение вертикального армирования не только увеличило несущую способность фундамента, но и способствовало оптимальному перераспределению напряжений в массиве грунта, что минимизировало неравномерные осадки. **Заключение.** Плитные фундаменты с вертикальным армированием представляют собой надежное и экономически эффективное решение при строительстве на слабых грунтах. Проведенное исследование подтверждает, что оптимальное проектирование армирующих элементов – в частности, их длины и шага – играет ключевую роль в повышении эффективности фундаментов. Полученные результаты могут быть напрямую применены для улучшения проектирования и обеспечения надежности фундаментов многоэтажных зданий в сложных инженерно-геологических условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несущая способность, модель грунта, плитный фундамент, осадка, вертикальный армирующий элемент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Аленов К.Т., Бесимбаев Е.Т., Бисенов К.А., Шадкам А.С., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н. Моделирование и оценка эффективности вертикально армированного основания плитного фундамента многоэтажного здания. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):151–172. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-151-172. – EDN: YMAFFY.

© Аленов К.Т., Бесимбаев Е.Т., Бисенов К.А., Шадкам А.С., Ниетбай С.Е., Молдамуратов Ж.Н., 2025

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Modelling and efficiency assessment of vertically reinforced slab foundation of multi-storey building

Kanat T. Alenov[1], Yerik T. Bessimbayev[2], Kylyshbay A. Bissenov[1, 3], Assylbek S. Shadkam[2], Sayat E. Niyetbay[2, 4*], Zhangazy N. Moldamuratov[4, 5*]

[1] Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan
[2] Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[3] Kyzylorda Open University, Kyzylorda, Kazakhstan
[4] International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan
[5] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

* Corresponding author: e-mail: sayat_90@inbox.ru, zhanga_m_n@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The aim of this study is to investigate the structural behavior and effectiveness of slab foundations reinforced with vertical elements, a technique increasingly employed in civil engineering to improve the performance of foundations on weak, compressible soil. Traditional slab foundations often suffer from excessive settlement and low bearing capacity, especially under high loads from multi-storey buildings. Reinforcement of the soil base provides a viable solution to these challenges by improving stiffness and reducing deformation. **Methods and Materials.** The study is based on numerical modeling using the finite element method (FEM) in PLAXIS 3D software, applying the Hardening Soil model in accordance with Eurocode 7. A 9-storey building with a monolithic slab foundation was modeled, and different configurations of vertical reinforcing elements were analyzed. The key parameters varied in the simulations included the spacing (2×2 m, 3×3 m, and 5×5 m) and length (2.5 m, 5.5 m, and 9.5 m) of reinforcing elements. Soil properties were derived from site-specific geotechnical investigations. **Results and Discussion.** The analysis showed that reinforcing the slab foundation significantly reduced deformation (by a factor of three) and bending moments (by up to 60%) compared to the unreinforced case. The most efficient configuration was found to be concrete elements of 9.5 m length with 2×2 m spacing. The use of vertical reinforcement not only increased the bearing capacity of the foundation but also optimized the stress distribution within the soil mass, minimizing differential settlement. **Conclusion.** Vertically reinforced slab foundations provide a reliable and cost-effective solution for construction on weak soils. The study confirms that optimal design of reinforcing elements – particularly their length and spacing – plays a crucial role in improving foundation performance. These findings can be directly applied to enhance the design and safety of multi-storey building foundations under challenging geotechnical conditions.

KEYWORDS: bearing capacity, soil model, slab foundation, settlement, vertical reinforcing element

FOR CITATION:
Alenov K.T., Bessimbayev Y.T., Bissenov K.A., Shadkam A.S., Niyetbay S.E., Moldamuratov Zh.N. Modelling and efficiency assessment of vertically reinforced slab foundation of multi-storey building. *Nanotechnologies in Construction.* 2025;17(2):x151–172. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-151-172. – EDN: YMAFFY.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время зачастую появляются проблемы при освоении территорий, ранее нежелательных для строительства многоэтажных зданий. При повышении нагрузки на основание или неблагоприятных инженерно-геологических условиях площадок строительства обеспечение качества геотехнического проектирования является актуальным вопросом строительства.

Национальные нормы многих стран рекомендуют решение этих проблем технико-экономическими расчетами путем сравнения вариантов с другими традиционными решениями, применительно к конкретным инженерно-геологическим условиям. Несмотря на это, мы зачастую сталкиваемся с увеличением нагрузки, передаваемой на основания фундамента, которое часто не приводит к желаемым результатам. Этот вопрос особенно остро встает, когда слабые грунты имеют значительную глубину залегания [1].

Более эффективным решением конструктивной схемы многоэтажных зданий с каркасно-пространственной системой является применение фундаментной плиты на естественном основании. Если строительство ведется на просадочных грунтах, это решение особенно актуально для обеспечения надежности строительных конструкций, фундаментов и оснований. Благодаря своей конструкции и способности к распределению нагрузок плитный фундамент обеспечивает высокую устойчивость и прочность конструкции.

Несмотря на эти преимущества, эксперты отмечают возникновение упругопластических деформаций в контурной зоне фундаментной плиты. Поэтому для многоэтажных зданий рекомендуется свайный или свайно-плитный фундамент с улучшением строительных свойств грунтов основания [1–5].

Строительные нормы проектирования Казахстана, адаптированные под Еврокоды, в качестве улучшения строительных свойств грунтов основания рекомендуют армирование грунта основания вертикальными армирующими элементами [6, 7]. В данном случае армированный грунт следует рассматривать как искусственный грунтовый массив с улучшенными свойствами за счет наличия армирующих элементов. При армировании естественных грунтов в основаниях зданий и сооружений в обоснованных случаях следует использовать цементогрунтовые, щебеночные, песчаные, известковые и другие виды вертикальных армирующих элементов, за счет которых геомассив приобретает анизотропию механических и фильтрационных свойств и тем самым повышает несущую способность со снижением сжимаемости или изменением направления его деформаций либо ускорением консолидации в процессе уплотнения [8].

Анализ исследований показывает, что одним из важных преимуществ улучшения физико-механических характеристик грунтов армированием заключается в том, что оно позволяет создавать требуемое основание из имеющегося (местного) грунта. Это снижает трудоемкость работ по уплотнению грунта или их замене, повышает безопасность здания и сокращает сроки их возведения. Такой армированный грунт выдерживает неравномерные деформации зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях [9].

Отличительной особенностью вертикального стержневого армирования основания от обычных свайных фундаментов заключается в передаче нагрузки от вышележащих конструкций через грунт подушки на элементы вертикального армирования и на окружающий их грунт за счет сил трения. В этом случае работа армоэлемента в грунте обеспечивается боковым обжатием и силами трения. Армоэлемент через контактную поверхность с грунтом или с фундаментом воспринимает нагрузку своей верхней частью и передает ее на нижележащие слои своей нижней частью. Вертикальные стержни служат для восприятия сжимающих напряжений.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показали, что напряженно-деформированное состояние плитного фундамента на основания, армированные вертикальными элементами, зависит от расчетной модели грунта, конструктивного решения вертикально армированного основания и множества других факторов [10–13].

Расчетно-экспериментальные исследования геотехнических объектов проводятся на двух наиболее популярных упругопластических моделях, модель Кулона-Мора и модель упрочняющегося грунта Hardening Soil. Результаты расчетов программой PLAXIS позволили учесть область применяемости моделей с целями задачи проектирования и рекомендуют модели упрочняющегося грунта Hardening Soil для расчетов напряженно-деформированного состояния строящихся геотехнических объектов, а модель Кулона-Мора – для оценки предельного напряженного состояния [14–20]

В последнее время во многих странах при оценке надежности геотехнических проектов практикуют концепции проектирования, основанные на показатели надежности и вероятной изменчивости всей пространственной системы, как надземных конструкций так и грунтового массива под сооружением [21–24].

Некоторые теоретические модели, основанные на нелинейном анализе, основываются на показателях надежности и вероятности разрушения или отказа. Еврокод EN 1997, основанный на условиях предельного состояния, также рассматривает предельное состояние (ULS), связанное с разрушением или отказом, с определением критериев отказа в зависимости от возможной причины отказа. Применение теории вероятностей в определении фактической прочности и коэффициента безопасности геотехнической системы использовалось для решения геотехнических задач с учетом рисков [25, 26].

Однако некоторые авторы рекомендовали быть осторожными при использовании индекса надежности, особенно когда функция производительности сильно нелинейна и случайные величины не имеют нормального распределения. Поэтому случайность как геотехнических параметров, так и нагрузок не должна допускаться нормами, применяемыми при проектировании фундаментов [27].

Среди всех существующих методов расчета армированных грунтовых оснований (эмпирический, аналитический и численный метод), позволяющих оценить с той или иной степенью точности напряженно-деформированное состояние грунта, ведущее место занимают численные методы. Эффективность численных методов связана с тем, что существующие аналитические методы расчета не позволяют с достаточной точностью прогнозировать осадки армированных оснований при деформациях грунтового массива из-за нарушений структуры грунта. Эмпирические методы имеют ограниченные условия применения и требуют для своей реализации проведения объемных и дорогостоящих натурных экспериментов. Для более точного прогноза в случае значительных осадков при переходе

грунтового основания в упругопластическую стадию работы необходимо решать нелинейную задачу с использованием методов расчета, позволяющих учитывать пластические характеристики работы грунта. В отличие от эмпирических и аналитических методов численные методы являются более универсальными.

Применение специализированных комплексных программ позволило учитывать нелинейные свойства грунтов основания при решении геотехнических задач. Использование современных ПК, таких как MIDAS GTX, Plaxsic 3D и других, при расчете плитного фундамента в сложных геологических условиях позволяет учитывать не только деформацию основания, но и напряженно-деформируемое состояние всей конструктивной системы, находящейся на плитном фундаменте [28-31].

Несмотря на это, в практике проектирования появляется множество вопросов, связанных с учетом неоднородности грунта в плане, напряженно-деформируемого состояния армирующих элементов и пространства между ними во времени, установления необходимого количества и размеров армирующих элементов, целесообразного их размещения, прогнозирования несущей способности и деформируемости, выбора оптимальных способов производства работ с учетом требований экономичности, надежности и экологической безопасности принятого.

Целью настоящей работы является выявление закономерности напряженно-деформированного состояния армированных грунтовых массивов и разработка конструктивного решения вертикально армированного основания плитного фундамента многоэтажного здания. Исследование проведено на примере конструктивного решения армирования основания реального объекта.

1.1 Постановка задачи

Для решения поставленных задач рассмотрим напряженно-деформированное состояние большеразмерной плиты на упругом грунтовом основании. В случае содержания аномальных слоев вводится дополнительный коэффициент формы загруженной площадки $b_ф = 2m_{экв}$.

Таким образом, вертикальное перемещение основания жесткой фундаментной плиты определяется следующем приближенным аналитическим выражением:

$$W = \frac{\beta_{equ} * qH}{E_{equ}} = \beta_{equ} * \frac{PH}{E_{equ} * S}, \quad (1)$$

где $\beta_{экв} = b_г \times b_ф$; $\beta_г$ – коэффициент Пуассона для грунтового основания;

H – мощность деформируемого слоя;

$E_{экв}$ – эквивалентный модуль деформации грунтового основания;

q – среднее давление под плитой;

S – площадь плиты.

Эквивалентный модуль деформации моделируемого однородного основания будет зависеть от метрических и физико-механических параметров слоев различной несущей способности и глубин их залегания.

При этом необходимо учесть, что при моделировании деформаций основания большеразмерной фундаментной плиты при равномерной нагрузке на плиту горизонтальные составляющие перемещения в любых горизонтальных плоскостях в плане плиты значительно меньше вертикальной составляющей. Поэтому их не рассматриваем.

Данный расчет, учитывающий совместную работу основания, плиты и надфундаментного строения, производится при следующих предпосылках:

- вертикальные перемещения точек здания и основания одинаковы;
- плита ортотропная постоянной толщины;
- силы трения между плитой и основанием отсутствуют;
- основание плиты характеризуется коэффициентом жесткости.

Проектирование основания реального объекта проводится из условия:

- определение требуемой длины армирующего элемента для обеспечения несущей способности деформируемой толщи массива грунта;
- определение расстояния между осями армирующего элемента для уменьшения деформации плитного фундамента.

Грунтовая подушка (буферный слой) толщиною 50 см устраивается послойным уплотнением щебенистого грунта, для равномерного распределения нагрузки на армированное грунтовое основание.

Способом устройства вертикально армирующего элемента в грунтовое основание рекомендована технология раскатки скважины как более эффективная и практичная.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для расчета используем программный комплекс PLAXIS 2D, основанный на методе конечных элементов, который используется для расчетов деформации и устойчивости различных геотехнических объектов. В качестве расчетной модели грунта выбрали упругопластическую модель упрочняющегося грунта HardeningSoil. Модель HardeningSoil более реально описывает пооведение грунтов при нагружении по сравнению с традиционной моделью Мора-Кулона и используется для более точного мо-

делирования поведения грунта под нагрузкой в геотехнической инженерии.

В качестве расчетного материала используем модель 9-этажного здания в монолитном исполнении, прямоугольной формы в плане, с размерами по осям 29,6×16,4 м. Конструктивная схема здания – перекрестно-стеновая (рис. 1).

Фундамент – монолитная плита высотой 100 см. Стены – монолитные, переменной толщины: плиты перекрытия – монолитные, толщиной 20 см. Все конструкции приняты из бетона класса В25.

Расчет ведется с использованием метода конечных элементов, для точного описания процессов, происходящих в сплошной грунтовой среде. На основе изменения геометрической формы сетки конечных элементов можно определить перемещение и усилия в узловых точках от внешних воздействий.

Основными выходными величинами расчета, на основе метода конечных элементов, являются перемещение и усилия в узловых точках основания и на плитном фундаменте.

Для расчета использовались данные инженерно-геологических изысканий реального объекта. Характеристики грунтов по инженерно-геологическим элементам (ИГЭ) представлены в табл. 1.

Для построения геологической модели основания здания на PLAXIS приняли массив грунта с размерами сторон 80х120 м, который представлен на рис. 2, и данные геологической модели массива грунта в графическом виде рис. 3.

Расчетные характеристики фундаментной плиты для оценки напряженно-деформированного состояния при различных стадиях нагружения, подготовленные с помощью графических средств, приведены на рис. 4.

Среднее давление на фундаментную плиту от веса вышележащих конструкций и нормативных нагрузок составляет 20,0 т/м^2 (рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В процессе нагружения основания весом фундаментной плиты и вышележащих конструкций получили деформированную схему массива грунта (рис. 6). Можно увидеть отличие в изменениях сетки конечных элементов.

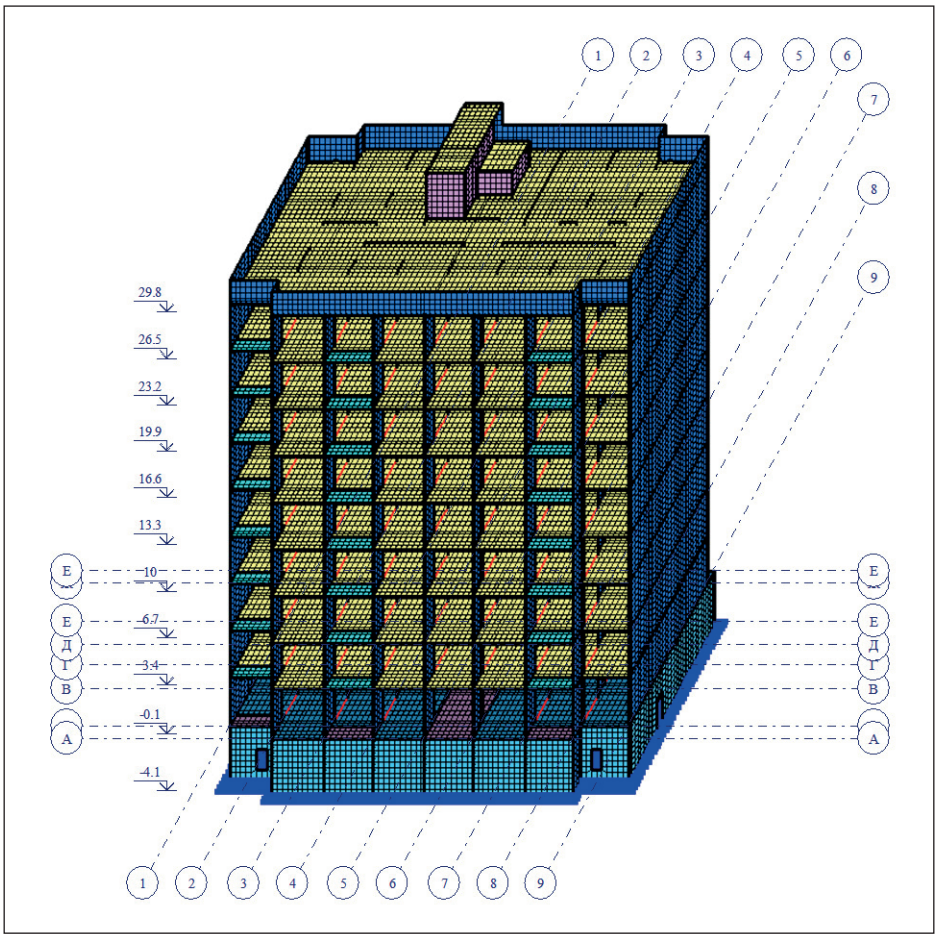


Рис. 1. Конструктивная схема здания

Таблица 1. Характеристики грунтов по инженерно-геологическому разрезу на глубину до 25 м

Наименование грунта	Основные характеристики грунтов	Дополнительные параметры для модели HSS
ИГЭ-1 супеси пылеватые серые с растительными остатками, с прослоями песка, текучие	γ = 18,8 кН/м³, ν = 0,35, c = 7 KPa, φ = 21, E = 5400 KPa	E_{50}^{ref} =5400 кПа, E_{oed}^{ref} =5400 KPa, E_{ur}^{ref} = 16200 KPa, Ko = 0,642
ИГЭ-2 суглинки пылеватые серые неясно слоистые с растительными остатками текучие	γ = 18,9 кН/м³, ν = 0,35, c = 4 KPa, φ = 17, E = 5000 KPa	E_{50}^{ref} = 5000 кПа, E_{oed}^{ref} = 5000 KPa, E_{ur}^{ref} = 15000 KPa, Ko = 0,708
ИГЭ-3 супеси пылеватые серые с гравием, галькой, с прослоями суглинка пластичные	γ = 21,4 кН/м³, ν = 0,35, c = 20 KPa, φ = 21, E = 12 000 KPa	E_{50}^{ref} = 12000 KPa, E_{oed}^{ref} = 12000 KPa, E_{ur}^{ref} = 36000 KPa, Ko = 0.642
ИГЭ-4 супеси пылеватые серые с гравием, валунами с прослоями суглинка твердые	γ = 18,8 кН/м³, ν = 0,35, c = 7 KPa, φ = 21, E = 5400 KPa	E_{50}^{ref} = 5400 кПа, E_{oed}^{ref} = 5400 KPa, E_{ur}^{ref} = 16200 KPa, Ko = 0,642

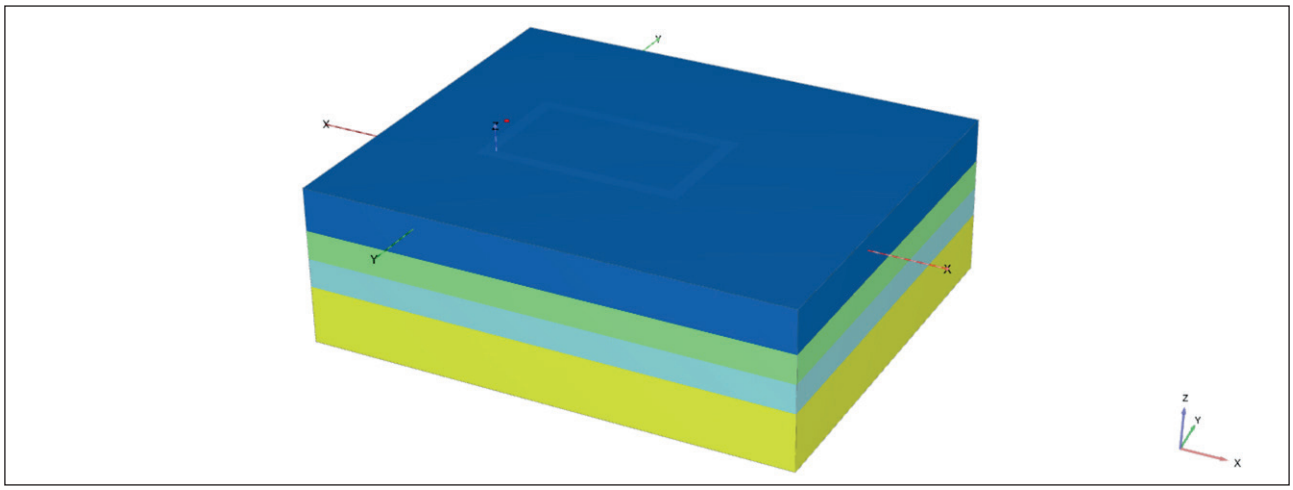


Рис. 2. Характеристики грунта по инженерно-геологическому разрезу в PLAXIS

Результаты расчета на модели грунта Hardening soil показывают, что максимальное значение деформации 124,3 mm зафиксировано в центральной части фундаментной плиты (рис. 7). При этом характер деформаций в форме осадочной воронки на поверхности основания также имеет большое сходство за счет использования в моделях единой теории упругого полупространства. Деформирование сетки конечных элементов в форме осадочной воронки, с уменьшением деформации ближе к краю плиты, соответствует развитию пластических деформаций в грунте.

Результаты по усилиям и изгибающим моментам в фундаментной плите от приложенной внешних воздействий соответствуют граничным условиям и заданной нагрузке. Максимальное усилие N, равное 1461,2 kN/m, зафиксировано по краям фундаментной плиты (рис. 8). Это можно объяснить неполной эпюрой контактных давлений на краях, аппроксимированной кусочно-постоянной функцией. Значение максимального момента M, 476,2 kN/m/m, зафиксированное на участках ближе к краевой зоне (рис. 9), связано с нелинейным поведением грунта и появлением зон пластических деформаций. Значение момента на фундаменте отличается в 3 раза. Расчеты показывают, что учет нелинейной работы основания существенно не влияет на напряженно деформированное состояние фундаментной плиты. С учетом нелинейной работы увеличивается только абсолютная осадка конструкции. Результаты, приведенные в данном расчете, показывают, что даже при однородных в плане свойств грунта учет пластического поведения основания в ряде случаев оказывает влияние на НДС плиты.

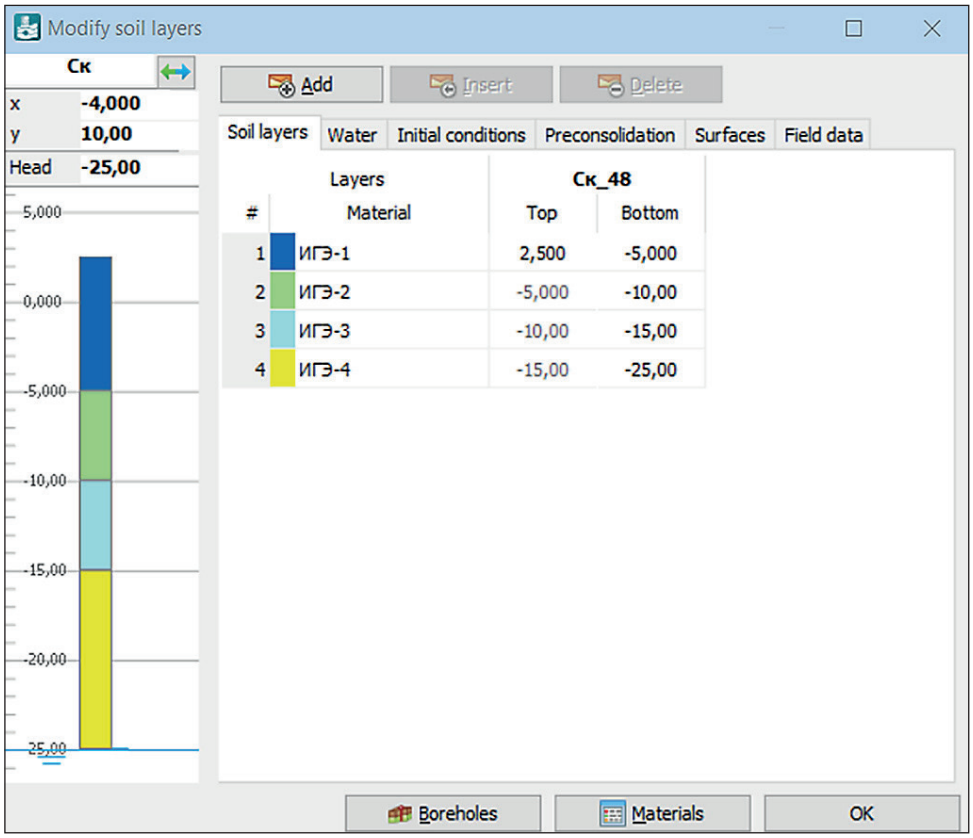


Рис. 3. Геологическая модель массива грунта в графическом виде программы PLAXIS

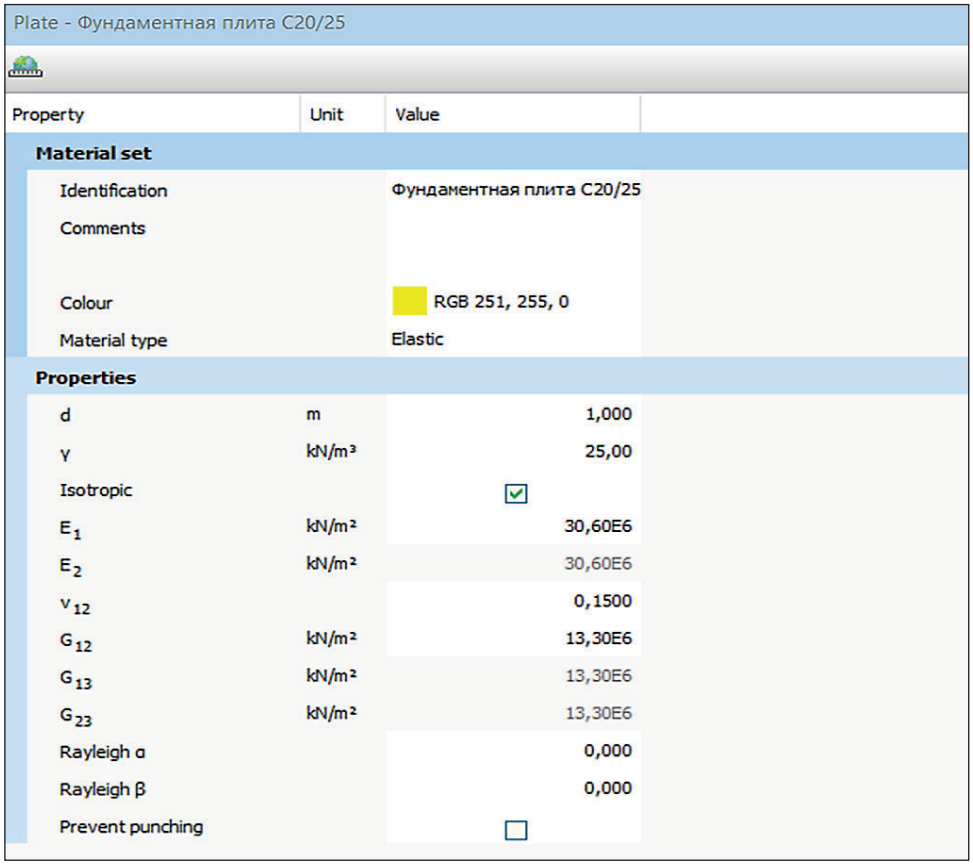


Рис. 4. Характеристики фундаментной плиты толщиной 1,0 м (Бетон B25) в графическом виде программы PLAXIS

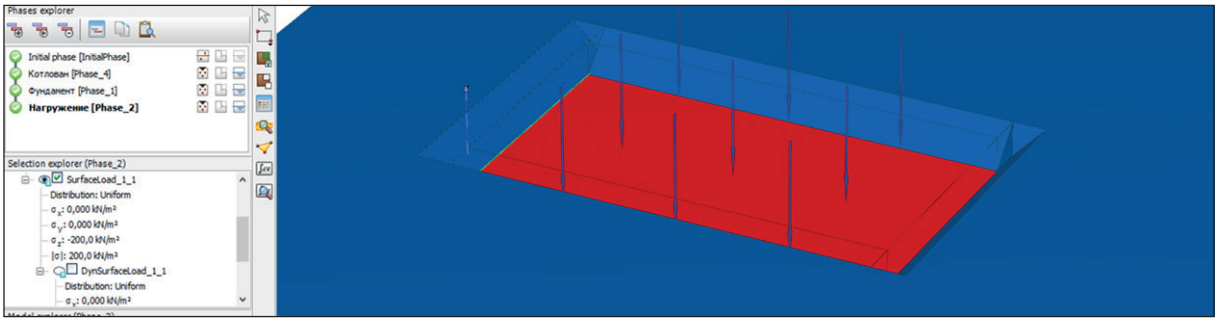


Рис. 5. Среднее давление на плиту – 20,0 т/м^2

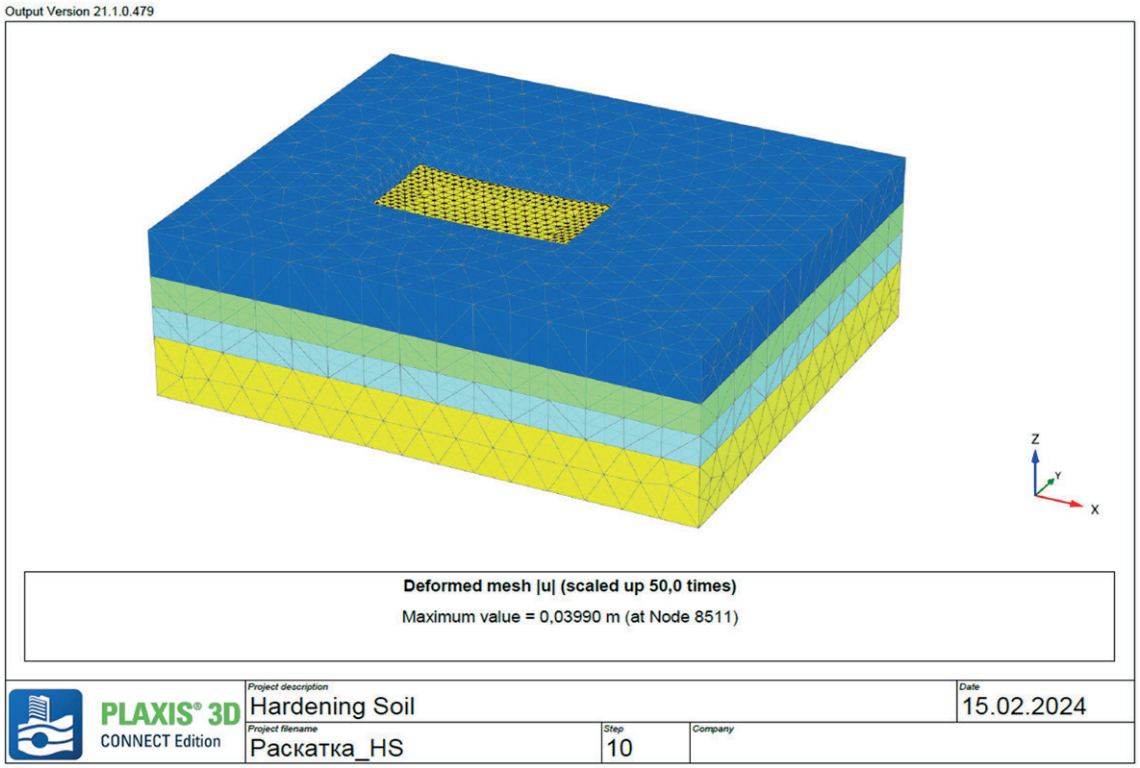


Рис. 6. Деформированная схема основания (Hardening Soil)

Осадка большеразмерной фундаментной плиты на нелинейно деформируемом неоднородном основании нелинейно зависит от нагрузки, что полностью соответствует многочисленным теоретическим и экспериментальным данным. Развитие больших деформаций во многом зависит от пластических деформаций, которые могут составить до 50% конечной осадки.

Результаты осадки основания от действующей нагрузки, представленной на рис. 7, показывают, что, деформация фундаментной плиты выше допустимых значений (65–100 мм). Результаты расчета указывают на проблему с несущей способностью основания в слоях грунта ниже уровня фундамента.

Проектирование армирования основания и параметров армирующих элементов

Анализ исследования устойчивости геотехнических сооружений показывает, что целенаправленное включение в грунт армирующих материалов повышает прочность и уменьшает деформативность основания, снижает неравномерность осадки здания. Практика проектирования основания фундаментов методом вертикального стержневого армирования показала себя как один из эффективных методов обеспечения устойчивости основания плитного фундамента.

Армированный геомассив в совокупности представляет собой композитную систему, которая

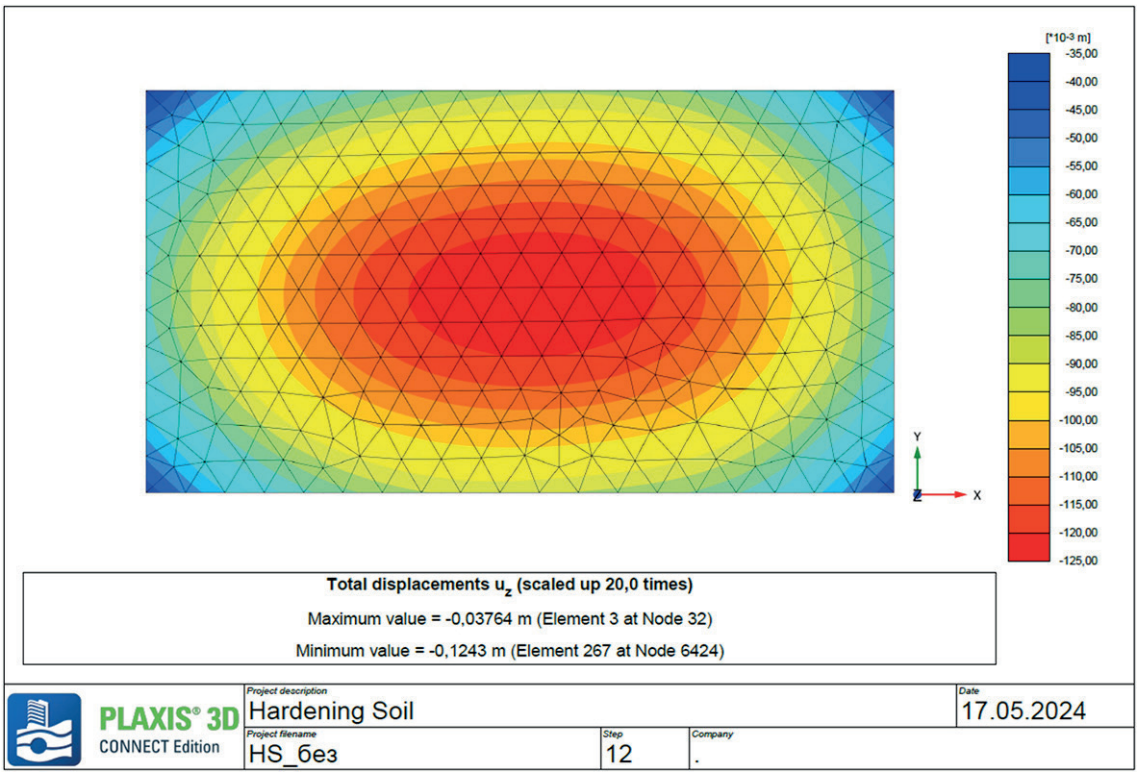


Рис. 7. Деформация фундаментной плиты (max 124,3 mm)

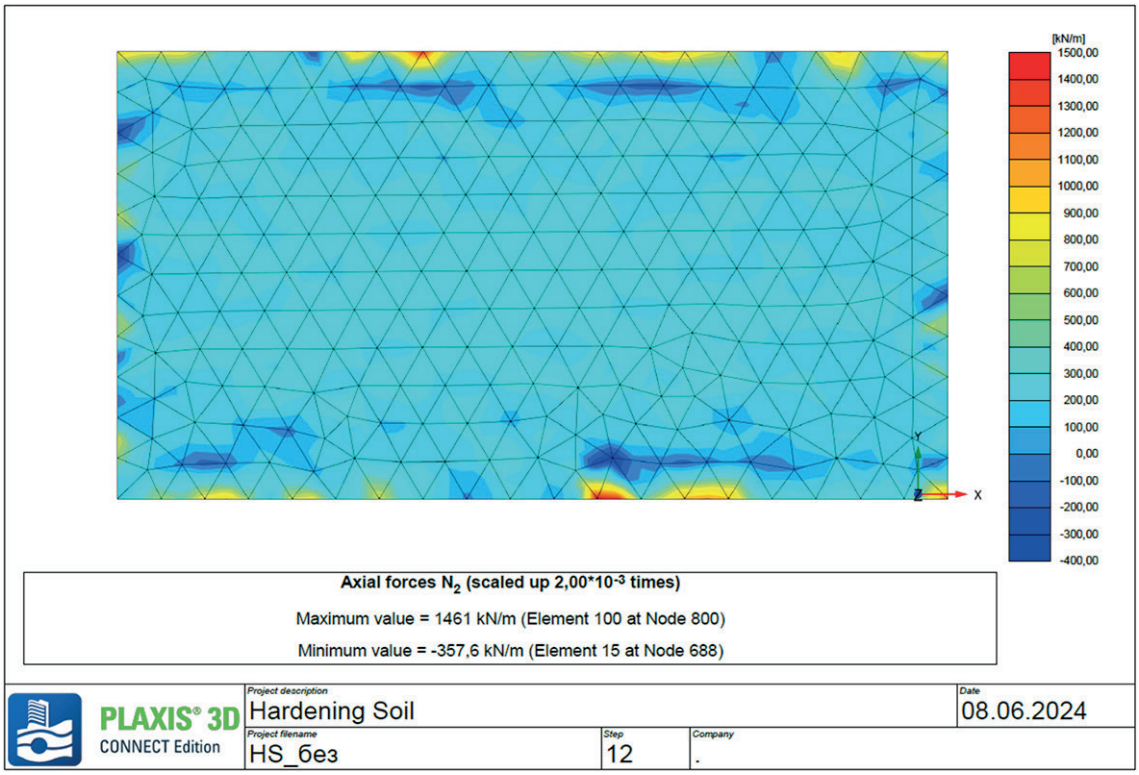


Рис. 8. Значение усилия N на плитном фундаменте (max 461,2kN/m)

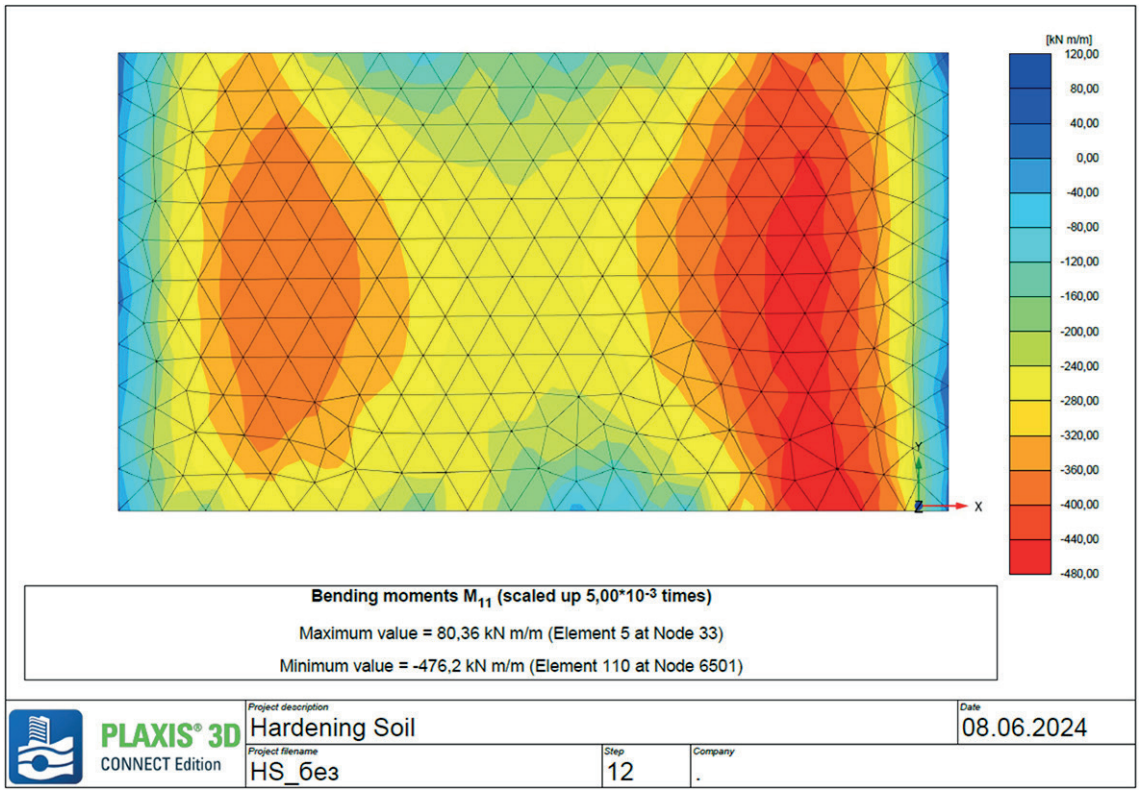


Рис. 9. Значение момента M на плитном фундаменте (max 476,2 kN/m/m)

в целом характеризуется приведенными характеристиками геомассива: модулем деформации E_2 и расчетным сопротивлением R_2. В этой модели нагрузка от здания перераспределяется на весь массив закрепленного грунта, что исключает появление зон повышенных напряжений. Важное достоинство данного метода заключается в том, что по сути проектировщик конструирует основание, создавая необходимые физико-механические характеристики, необходимые для решения практических задач.

Нормы проектирования рекомендуют рассматривать упрочненное основание как трансверсально-изотропную среду и рассчитывать по двум группам предельных состояний: критические предельные состояния и предельные состояния по эксплуатационной пригодности.

В этом случае расчет оснований выполняется по достижении предельного состояния по разрушению или чрезмерным деформациям основания (GEO) из условия:

$$\alpha R_2 + (1-\alpha)R_1 \geq P, \qquad S_{ar} \leq S_u, \qquad (2)$$

где $\alpha = V_{ap}/V_{гр}$ – коэффициент, характеризующий долю армирующих элементов в объеме усиливаемого грунта ((V_{ap}) – объем армирующих элементов, ($V_{гр}$) – объем грунта);

R_1 – расчетное сопротивление неармированного грунта под подошвой фундамента, кПа;

R_2 – расчетное сопротивление материала элементов усиления при условии замены естественного грунта армирующим, кПа;

P – среднее давление под подошвой фундамента, кПа;

S_{ap} – осадка армированной части основания;

S_u – предельное значение совместной деформации основания и сооружения.

Осадка армированной части основания (Sap) вычисляется методом послойного суммирования по формуле:

$$S_{ar} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_{zp.i} * h_i}{E_3}, \qquad (3)$$

где h_i – расчетная толщина i-го слоя грунта в пределах зоны сжатия армированного основания, принимается из условия 0.2 i h b (где (b) – ширина фундамента), м;

n – количество слоев, на которое разбивается сжимаемая толща армированного грунта;

$\sigma_{zp,i}$ – среднее значение дополнительного вертикального напряжения в i-ом армированном слое, равное полусумме указанных напряжений на верхней

(Zi–1) и нижней (Zi) границах слоя по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, кПа;

$E_з$ – модуль деформации армированного грунта в направлении, перпендикулярном поверхности грунта, кПа.

Деформативные характеристики (E, $E_з$) следует определять экспериментально, а при отсутствии опытных данных – по приближенным формулам:

$$E_3 = \alpha * E_{ap} + (1-\alpha)E_{uh}\ ,\quad \frac{1}{E} = \frac{\alpha}{E_{fh}} + \frac{1-\alpha}{E_{uh}}, \quad (4)$$

где E_{uh}, E_{fh} – модули деформации соответственно грунта и армирующих элементов, кПа.

При упрочнении грунтового массива вертикальными армирующими элементами, способными воспринимать повышенные сжимающие напряжения, следует использовать железобетонные, бетонные, цементогрунтовые вертикальные армирующие элементы, длины которых должны назначаться в пределах сжимаемой толщи грунта.

Предварительное количество армирующих элементов и их длину следует определять по формуле:

$$N_d/n = F_d/\gamma_d, \quad (5)$$

где N_d – расчетное воздействие, кН;

n – количество армирующих элементов (вертикальных армирующих элементов);

γ_d – коэффициент надежности по грунту;

Fd – несущая способность армирующих элементов (вертикальных армирующих элементов) по грунту (материалу), кН.

С целью уменьшения деформации плитного фундамента используем характеристики основания, армированного бетонными армирующими элементами DSM, из бетона B25. Характеристики бетонных армирующих элементов в графическом виде программы PLAXIS представлены на рис. 10.

В этом случае, когда армирование выполняется под плитный фундамент, нагрузка от вышележащих конструкций передается на грунтовый массив через армирующие элементы за счет сил трения. На представленной расчетной модели (рис. 9) работа армирующего элемента в грунте обеспечивается боковым обжатием и силами трения. Армирующий элемент через контактную поверхность с грунтом или с плитным фундаментом воспринимает нагрузку своей верхней частью и передает ее на нижележащие слои своей нижней частью. Здесь вертикальные бетонные армирующие элементы служат для восприятия сжимающих напряжений (рис. 11).

Анализ устойчивости армированного геомассива с колоннами DSM моделируется программным обеспечением Plaxis 3D. Для достижения оптимальных результатов предпочтительнее применять вертикальные армирующие элементы Ø300 мм и длиною L = 2,5 – 5,5–9,50 м. Расчетный анализ выполняется с помощью параметров, приведенных в табл. 2. При анализе армированного геомассива учитывались значения усилия, поперечной силы и изгибающего момента на на плитном фундаменте (рис. 12, 13).

Постановка задач: Моделирование напряженно-деформируемого состояния фундаментной плиты при разных сетках между осями – 2×2, 3×3, 5×5 м. Диаметр армирующего элемента 300 мм, длина 9,5 м (на глубину сжимаемой толщи).

Предварительный шаг армирующих элементов назначается от 7 до 11d диаметра армирующего элемента в зависимости от модуля деформации грунта, окружающего армирующий элемент, или из условий обеспечения совместной работы грунта в массиве, а также необходимой несущей способности уплотняемого основания.

В этом случае расстояние между центрами скважин определяют по формуле:

$$i_{ck} = 0.95d\sqrt{\frac{\rho_{dc}}{\rho_{dc}-\rho_d}}, \quad (6)$$

где p_d – плотность сухого грунта природного сложения, т/м^3;

p_{ds} – средняя плотность сухого грунта в уплотненном массиве, т/м^3.

В процессе бурения скважины раскатчиком зона грунта вокруг скважины уплотняется до определенного диаметра.

Для предварительных расчетов диаметр уплотненной зоны (ds), который может бытъ получен после раскатки, определяется по формуле:

$$d_S = \gamma_c\, d\sqrt{\rho_{ds}/(\rho_{ds}-\rho_d)}, \quad (7)$$

где d – диаметр РС, м;

ρ_{ds} – плотность сухого уплотненного грунта, т/м^3;

ρ_d – плотность сухого грунта естественного сложения, т/м^3;

γ_c – коэффициент условий работы грунта, принимаемый > 1.

Предварительный расчет диаметра уплотненной зоны для грунта площадки (рис. 12), для суглинка ρ_d = 1,88т/м^3 составляет 1,34 м, а также расстояние между центрами скважин 2,33 м.

Поэтому по конструктивным требованиям (i_{ck} = 7 до 11d) и на основании расчета минимальных размеров расстояние между центрами скважин принимаем 2×2 м.

Для окончательного выбора рационального варианта расстояния между центрами армирующих элементов для данного здания было решено выполнить анализ результатов изгибающих моментов и деформации в фундаментной плите (рис. 13–18).

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		ение от собственного веса
Comments		
Colour		RGB 55, 255, 0
Material type		Elastic
Properties		
d	m	9,500
γ	kN/m³	25,00
Isotropic		☑
E_1	kN/m²	30,60E6
E_2	kN/m²	30,60E6
ν_{12}		0,1500
G_{12}	kN/m²	13,30E6
G_{13}	kN/m²	13,30E6
G_{23}	kN/m²	13,30E6
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Prevent punching		☐

Рис. 10. Характеристики бетонных армирующих элементов (Бетон В25)

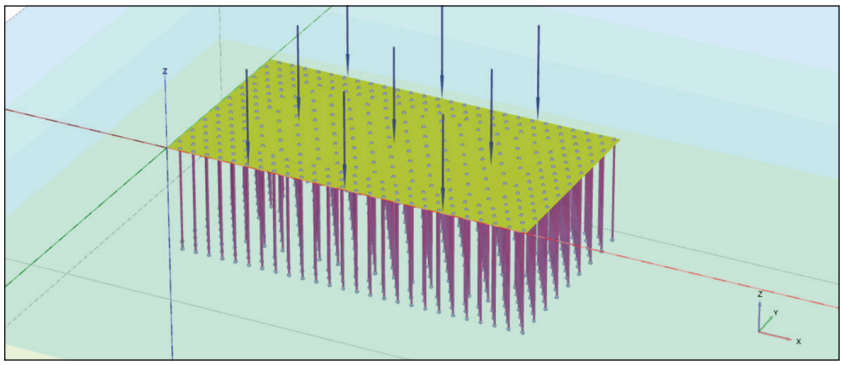


Рис. 11. Пространственная модель фундаментной плиты на бетонных армирующих элементах

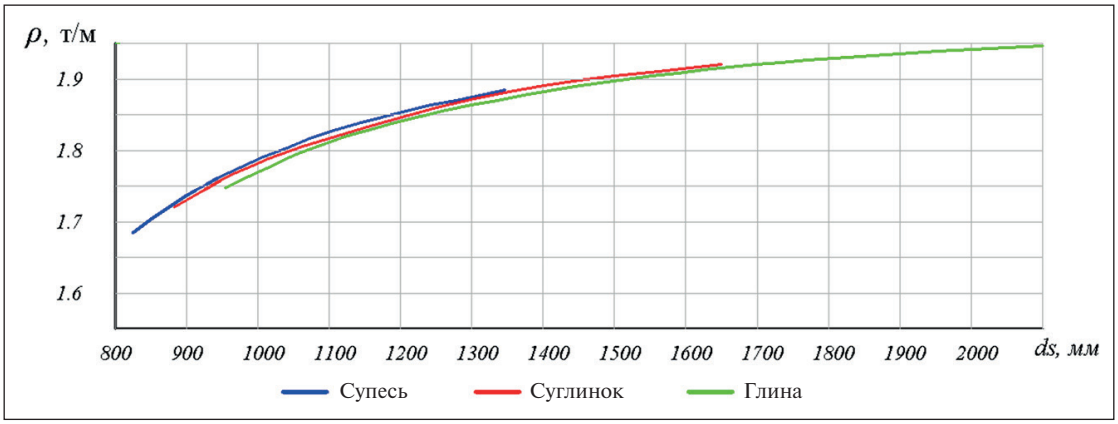


Рис. 12. Зависимость диаметра уплотненной зоны от плотности грунта

Таблица 2. Расчетные параметры для ПК PLAXIS с учетом армирования основания

Условия загрузки	Среднее давление (т/м²)	Вертикальная жесткость геомассива, т/м³
Статические условия (G+Q)	20,00	25,00

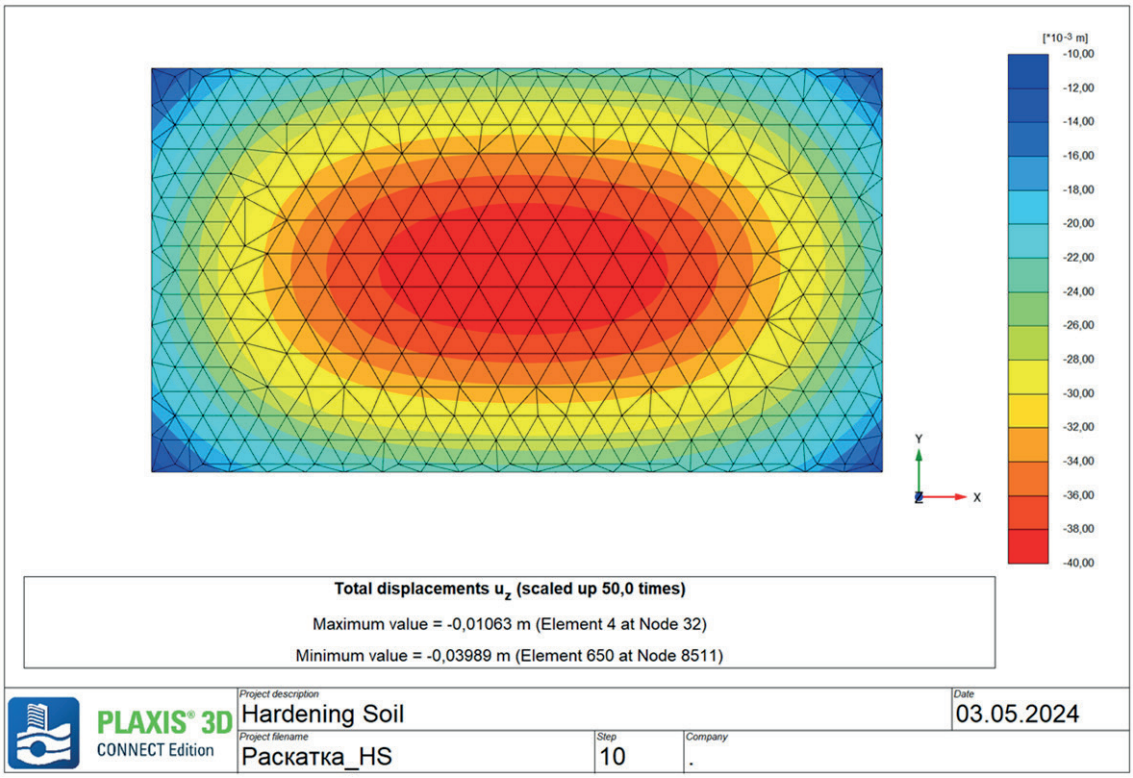


Рис. 13. Деформация фундаментной плиты, шаг армирующего элемента - 2x2 м, длина сваи - 9,5 м (max 39,9 mm)

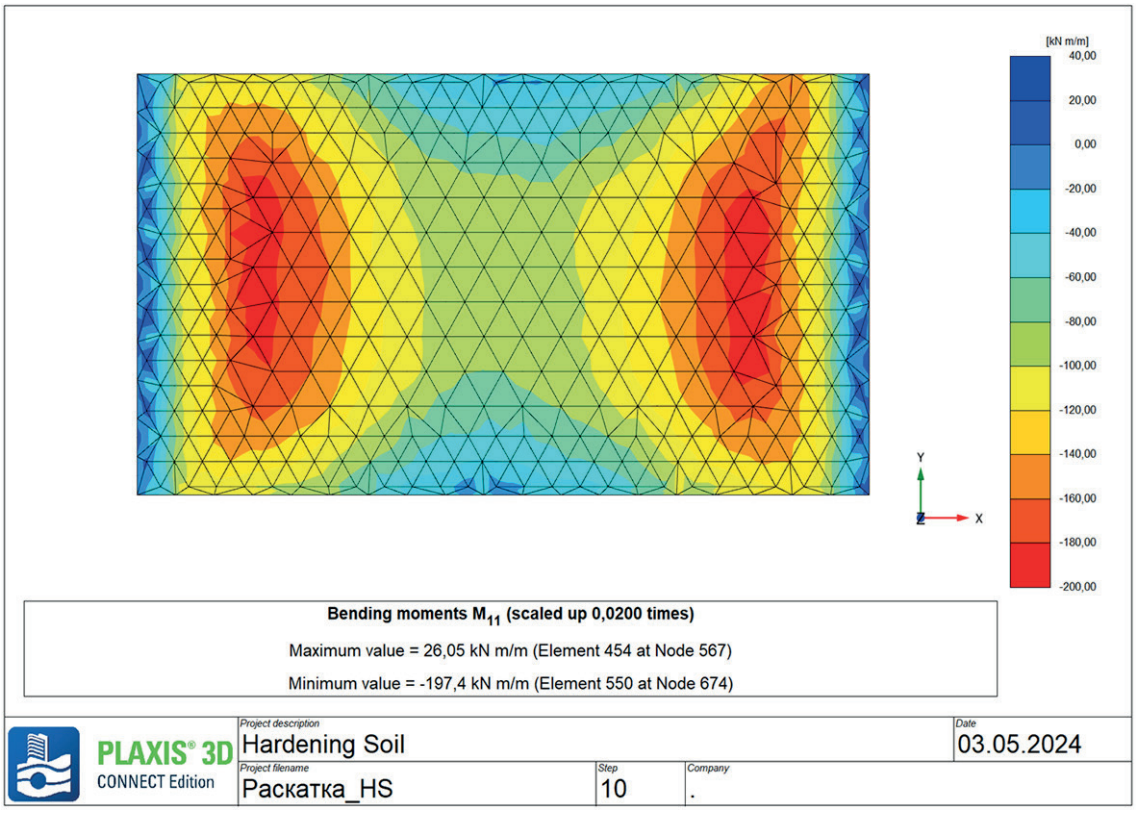


Рис. 14. Момент фундаментной плиты, шаг армирующего элемента 2x2 м, длина армирующего элемента 9,5 м (max 197,4 kN/m/m)

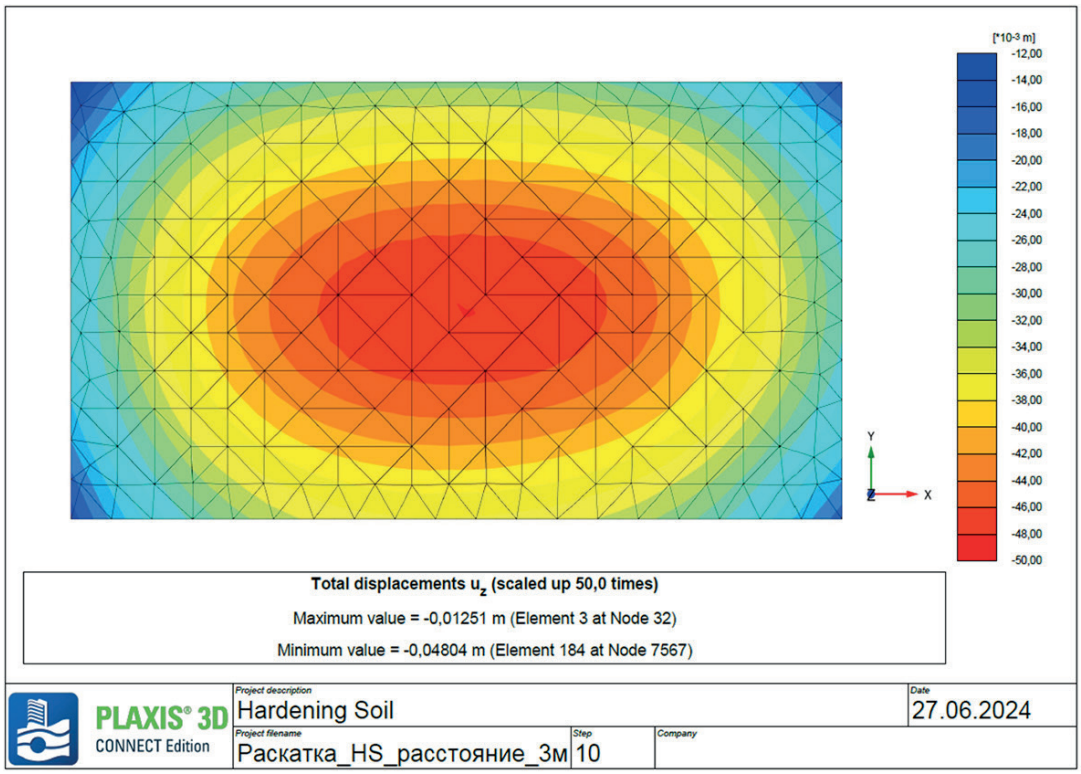


Рис. 15. Деформация фундаментной плиты, шаг армирующего элемента - 3х3 м, длина армирующего элемента – 9,5 м (max 48,04 mm)

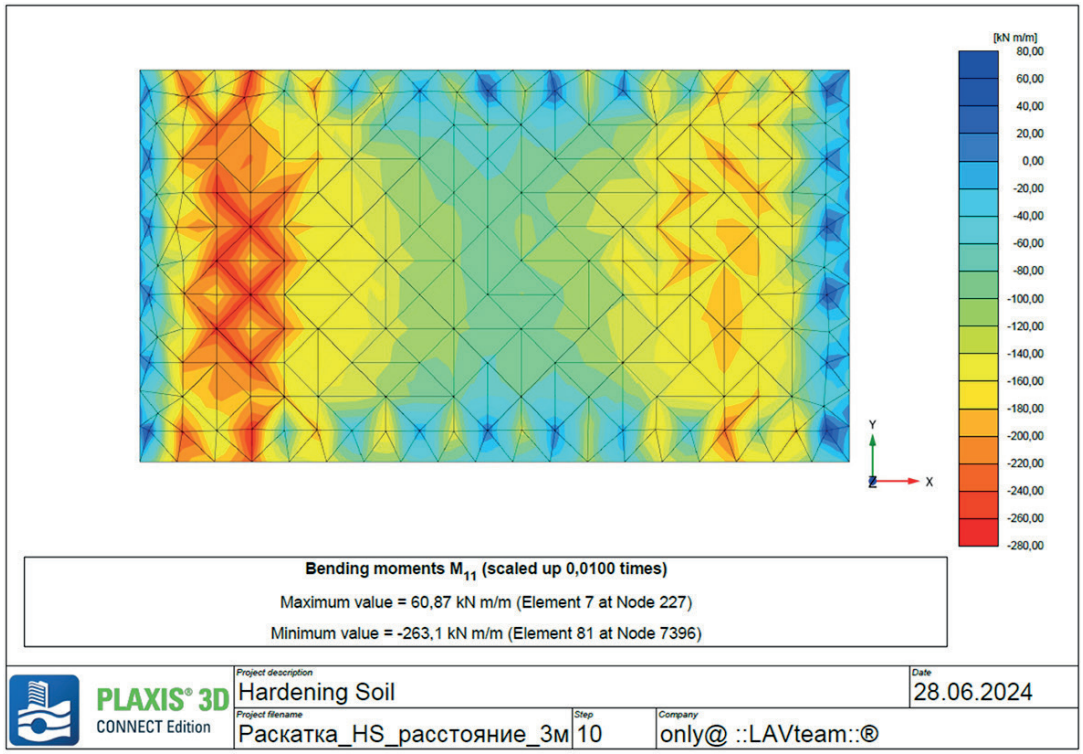


Рис. 16. Момент фундаментной плиты, шаг армирующего элемента - 3х3 м, длина армирующего элемента – 9,5 м (max 263,1 kN/m/m)

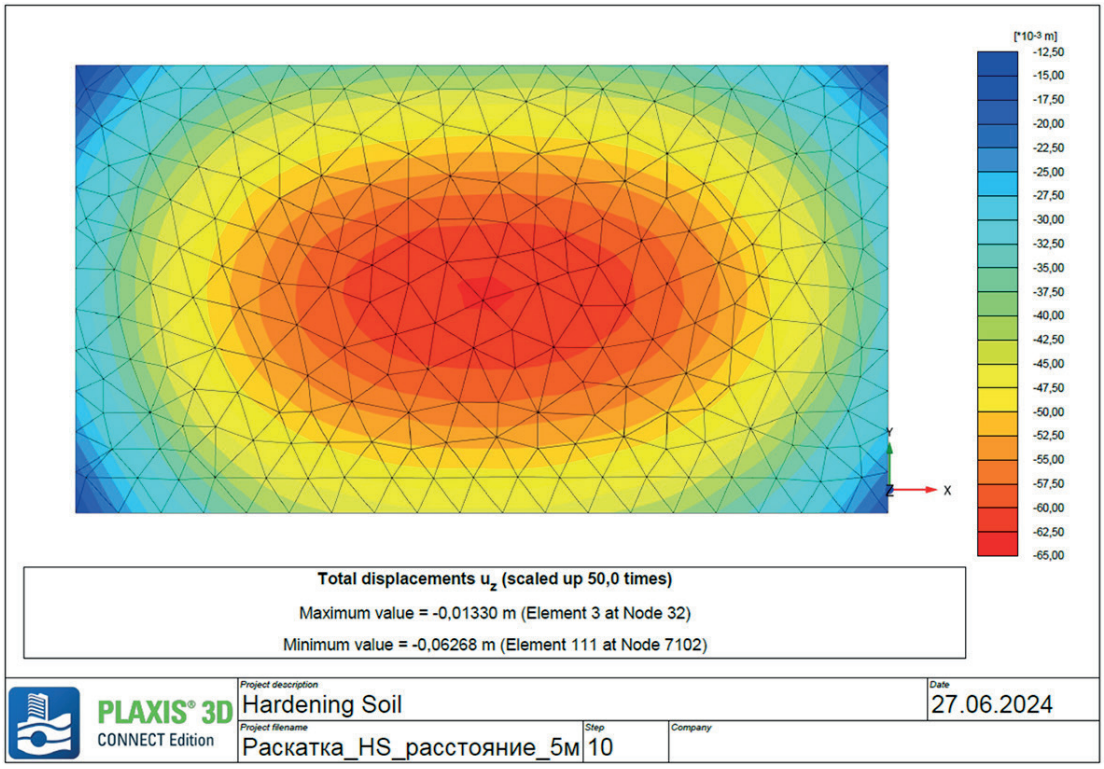


Рис. 17. Деформация фундаментной плиты, шаг армирующего элемента – 5×5м, длина армирующего элемента – 9,5 м (max 62,6 mm)

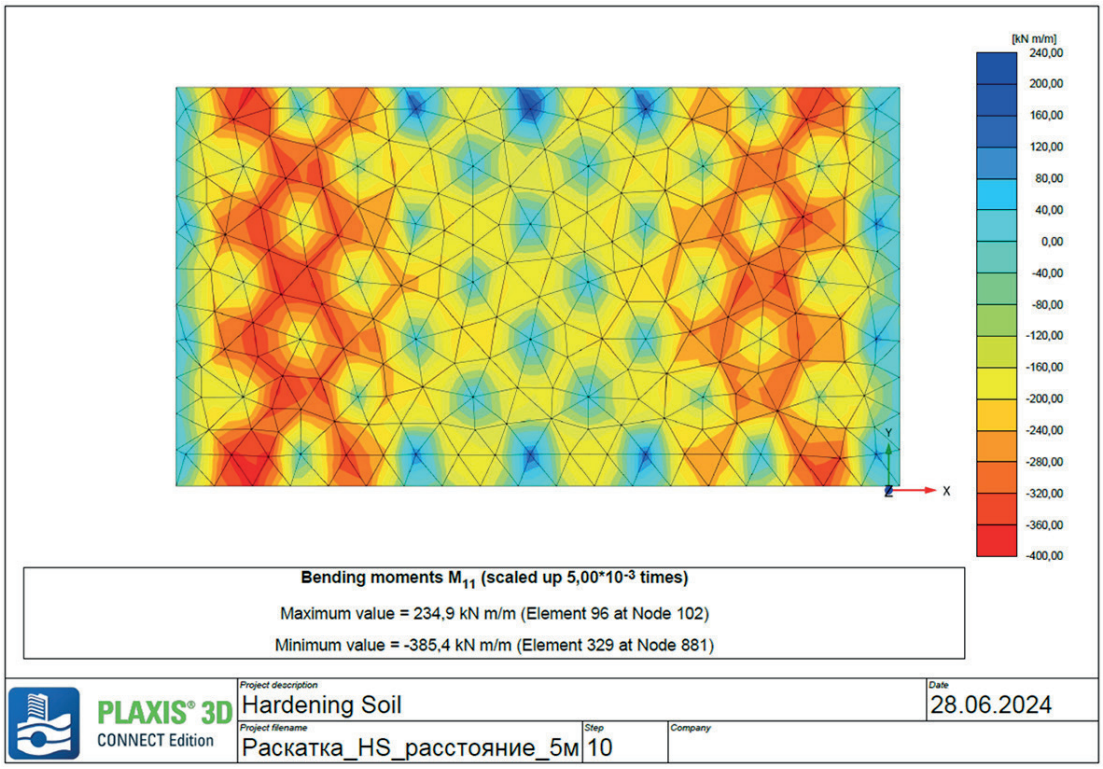


Рис. 18. Момент фундаментной плиты, шаг армирующего элемента – 5×5 м, длина армирующего элемента – 9,5 м (max 385,4 kN/m/m)

Таблица 3. Зависимость изгибающих моментов и деформации фундаментной плиты от расстояния между армирующими элементами

Сетка между армирующими элементами, м	Изгибающий момент, КН/м²	Деформация фундаментной плиты, мм
Без армир. элемента	476,2	124,3
2×2	197,4	39,9
3×3	263,1	48,04
5×5	385,4	62,6

Количественная оценка результатов представлена в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что значение изгибающих моментов и деформации фундаментной плиты повышается с увеличением расстояния между армирующими элементами. При шаге 2×2 м получение минимальных значений деформации и изгибающих моментов связано с обеспечением жесткости основания за счет увеличения плотности основания армирующими элементами. С увеличением расстояния между центрами уплотненной зоны до 5 м, за счет увеличения осадка в фазе уплотнения и сдвигов между армирующими элементами, в 2 раза увеличено значение изгибающего момента и деформации в фундаментной плите. Полученные значения позволили выявить оптимальные параметры конструкции армирующего элемента.

Постановка задач: моделирование напряженно-деформируемого состояния фундаментной плиты при разных длинах армирующего элемента: L = 2,5м, L = 5,5 м, L = 9,50 м. Диаметр армирующего элемента 300 мм. Оптимальным шагом между центрами уплотненной зоны выбрали 2×2 м.

Для окончательного выбора рационального варианта длины армирующего элемента для данного здания было решено выполнить анализ результатов изгибающих моментов и деформации в фундаментной плите (рис. 19–24). Количественная оценка результатов представлена в табл. 4.

Как видно из рис.25, с уменьшением длины армирующего элемента увеличивается осадка основания и возрастает деформация фундаментной плиты. При малых размерах длины 2,5–5,5 м, в пределах сжимае-

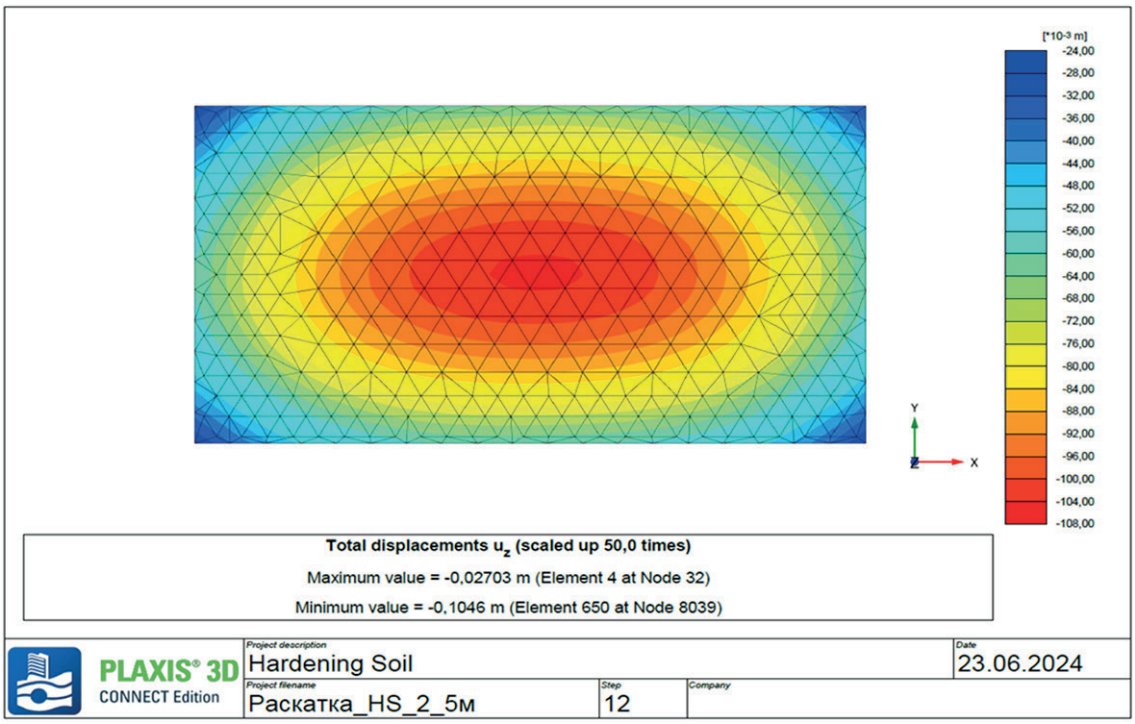


Рис. 19. Деформация фундаментной плиты, длина армирующего элемента 2,5 м, (max 104,6 mm)

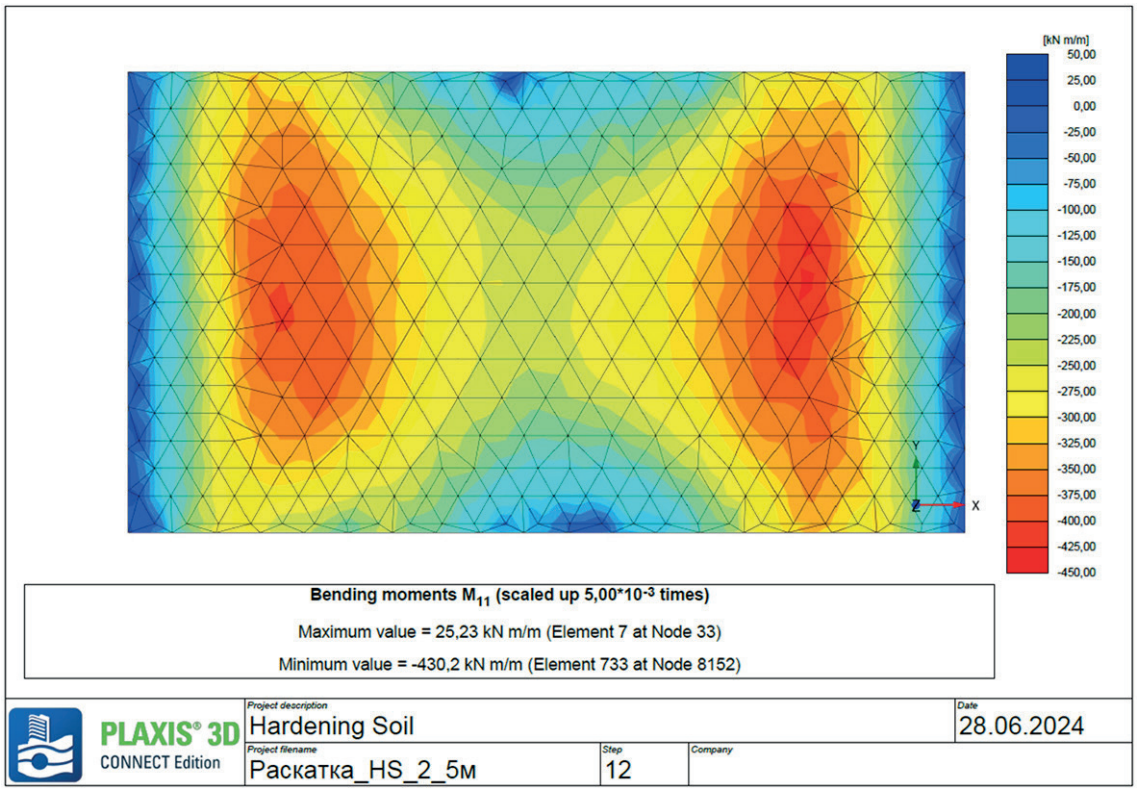


Рис. 20. Момент фундаментной плиты, длина армирующего элемента 2,5 м (max 430,2 kN/m/m)

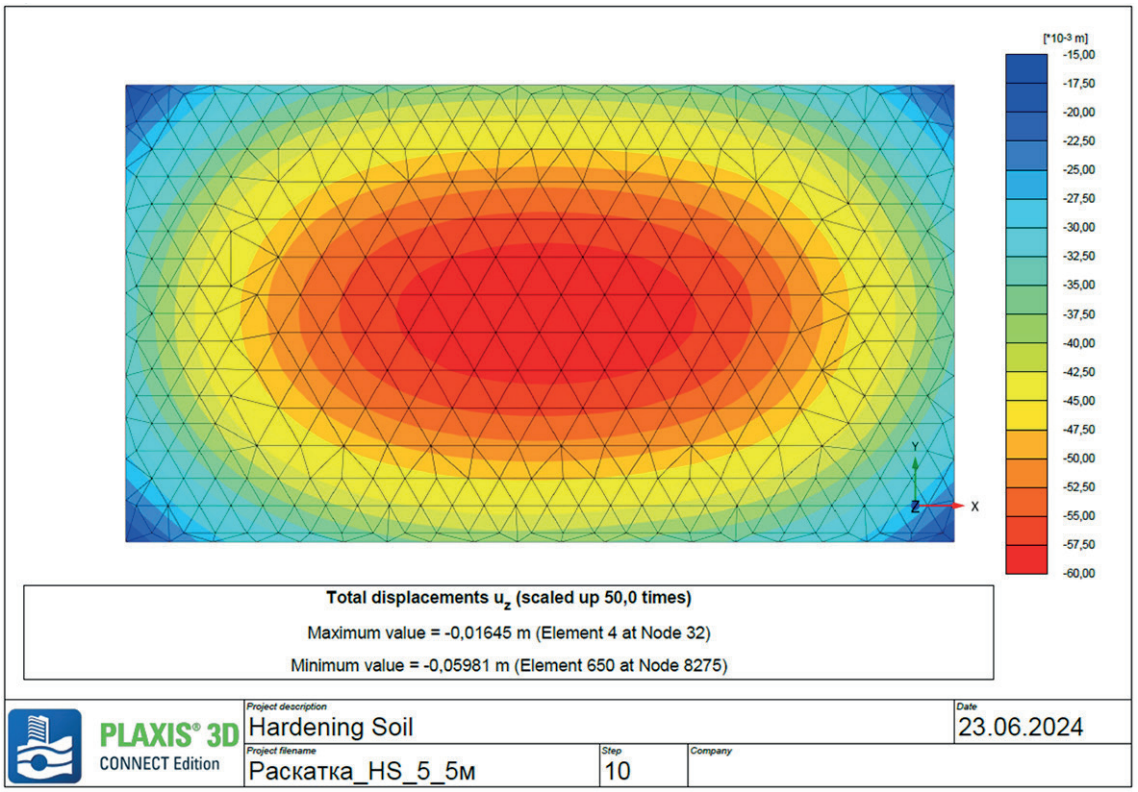


Рис. 21. Деформация фундаментной плиты, длина армирующего элемента 5,5м (max 59,81 mm)

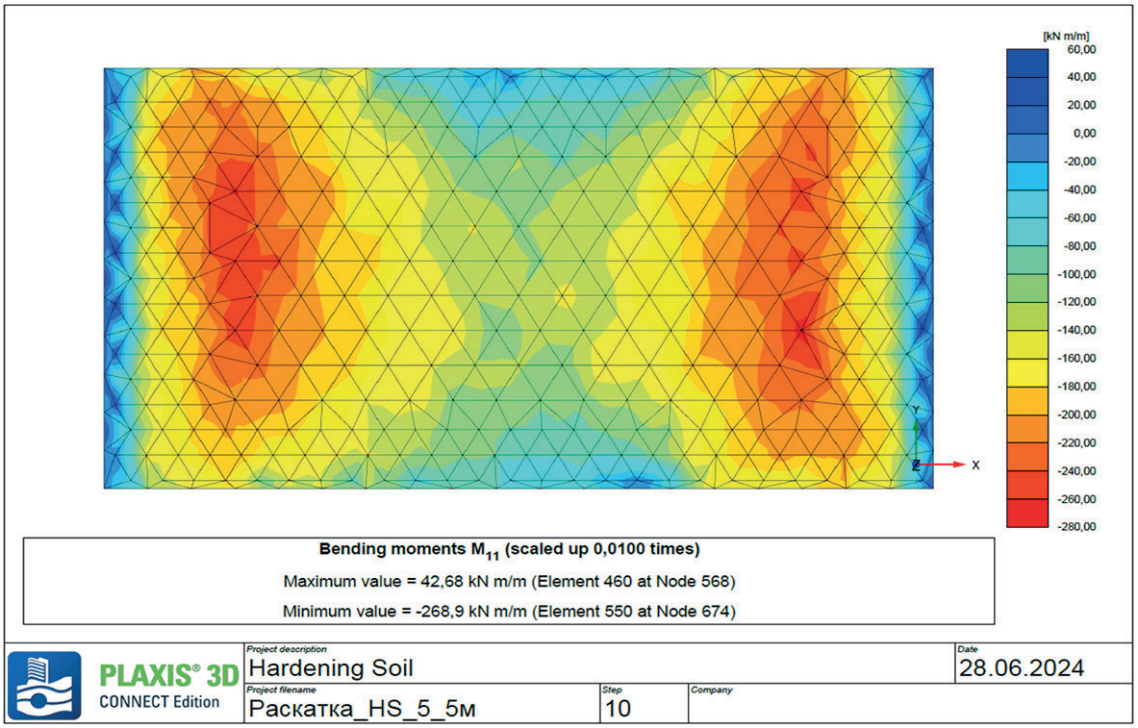


Рис. 22. Момент фундаментной плиты, длина армирующего элемента 5,5м (max 268,9 kN/m/m)

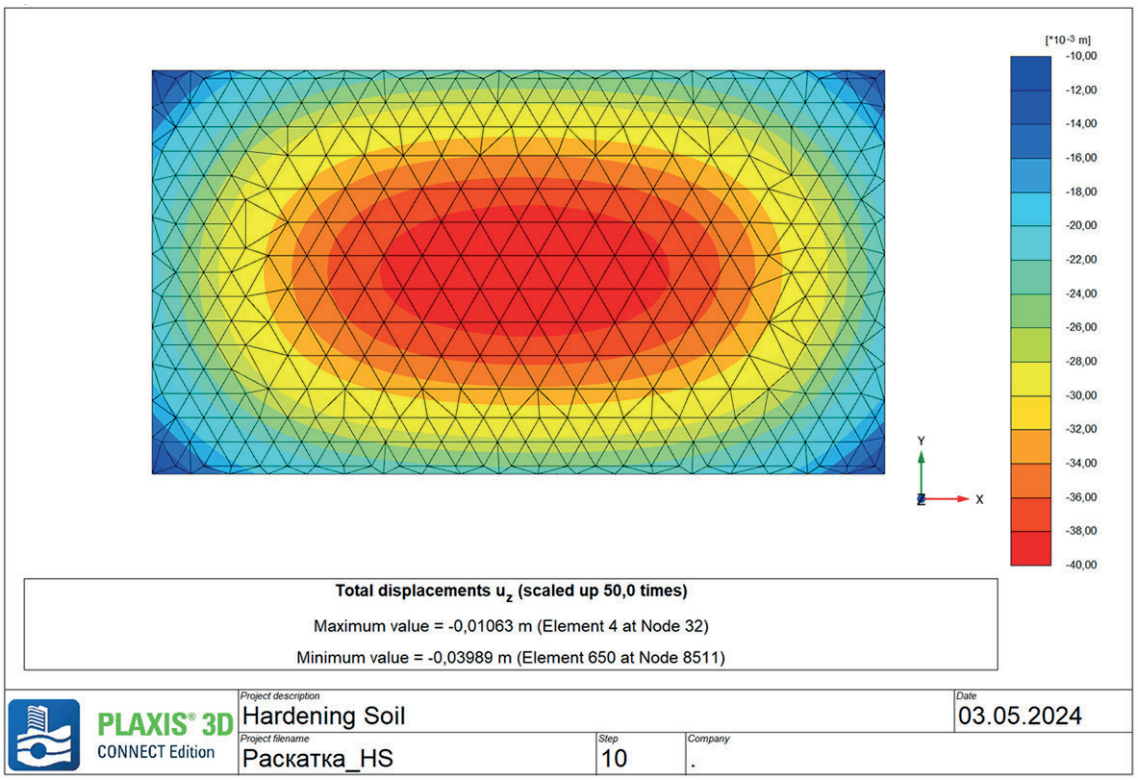


Рис. 23. Деформация фундаментной плиты, длина армирующего элемента 9,5 м (max 39,9 mm)

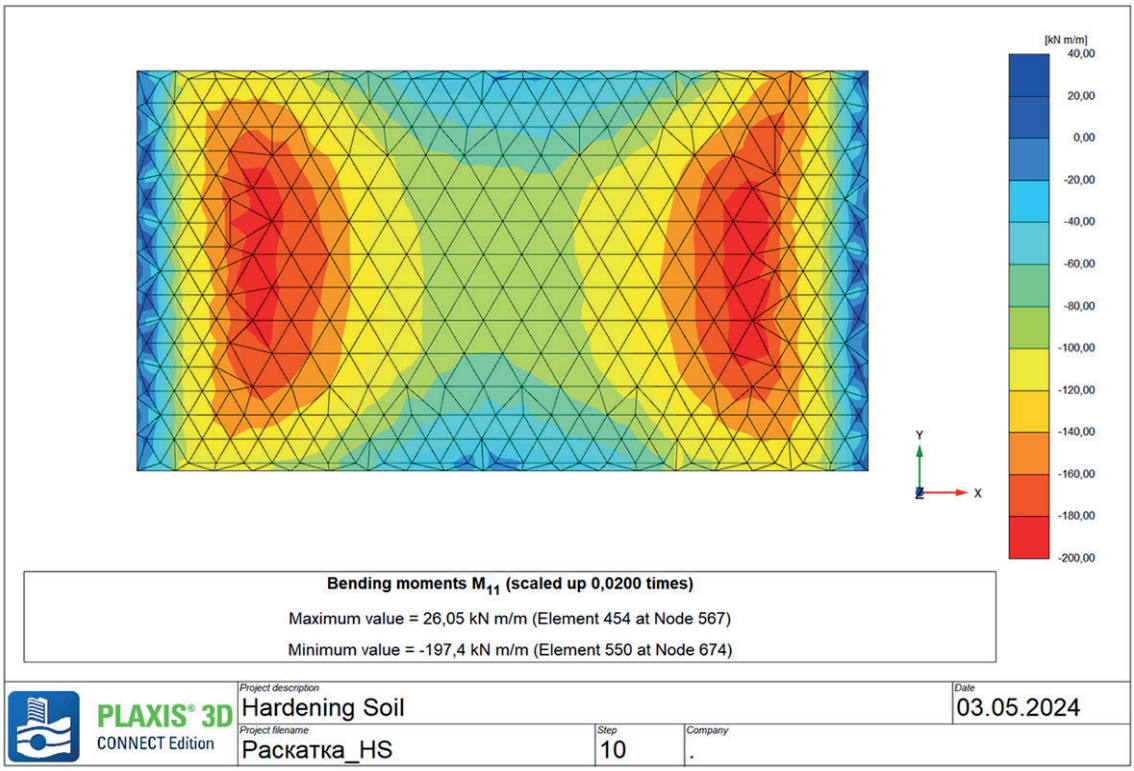


Рис. 24. Фундамент. Момент M, длина армирующего элемента 9,5 м (max 197,4 kN/m/m)

Таблица 4. Зависимость изгибающих моментов и деформации фундаментной плиты от длины армирующего элемента

Длина армирующего элемента, м	Изгибающий момент, КН/м	Деформация фундаментной плиты, мм
Без армир.элемента	476,2	124,3
2,5	430,2	104,6
5,5	268,9	59,81
9,5	197,4	39,9

мой толщи, армируемый элемент и окружающий его грунт работает по принципу метода равных деформаций, значение осадки зависит от их составляющих [32]. Эксперты также рекомендуют при оценке эффективных характеристик грунтового массива, усиленного армирующими элементами, учитывать эквивалентный модуль деформации армированного грунта [33–34]. С увеличением длины армирующего элемента значение эквивалентного модуля деформации армированного грунта возрастает, что эффективно влияет на снижение осадки армированного основания. Увеличение длины армирующего элемента от 2,5 м до 9,5 м позволило снизить деформацию фундаментной плиты в 3 раза, уменьшить величину изгибающего момента на 60% (табл. 4).

В итоге конструктивное решение вертикально армированного основания плитного фундамента многоэтажного здания: расстояние между армирующими элементами 2×2 м, длина – 9,5 м, диаметр 300 мм, материал – бетон В25. При этом максимальная расчетная осадка плитного фундамента S = 3,99 см. Предельная деформация основания в виде осадки согласно нормативной документации для многоэтажных зданий с полным железобетонным каркасом равна 15 см. Для зданий с фундаментами в виде сплошных плит предельные значения средних осадок допустимо увеличивать в 1,5 раза: [S] = 3,99 см·1,5 = 5,99 см. Так как максимальная расчетная осадка плитного фундамента S = 3,99 см меньше предельного значения средней осадки [S] = 3,99 см·1,5 = 5,99 см, то расчет по деформациям основания плитного фундамента выполнен успешно.

Увеличение несущей способности основания также связано с процессом устройства скважины

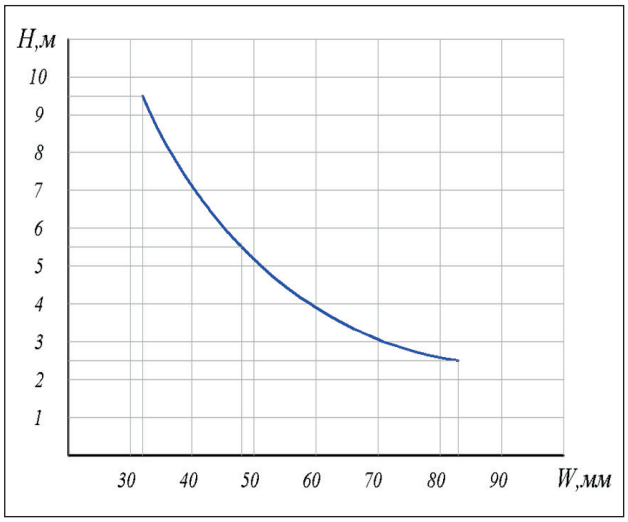


Рис. 25. График зависимости деформации плиты от длины армирующего элемента

бурением со специальным буровым наконечником раскаткой. Суть заключается в уплотнении стенки скважины буровым наконечником в процессе бурения. Здесь важно учесть увеличение плотности грунта вокруг стенки скважины в 2 раза, эффективно влияют на сопротивление ствола сваи за счет бокового трения. Здесь также надо учесть исключение факта возникновения технологического зазора при технологическом погружений сваи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования позволили обосновать эффективность применения армированных оснований на сильно сжимаемые грунты, с формированием жестких армирующих элементов с задаваемыми геометрическими размерами и физико-механическими и деформационными характеристиками.

2. Исследованием установлено, что эффективность армирования основания плитного фундамента обеспечивается устройством грунтовой подушки (распределительного слоя) песчаного или гравелистого грунта на толщину меньше плитной части фундамента.

3. Результатами расчетов установлено, что конструктивное решение вертикально армированному основанию плитного фундамента, а именно, шагу расстановки, диаметру и длине армирующих элементов, необходимо назначить исходя из инженерно-геологических условий площадки строительства.

4. Расчетно-экспериментальные исследования позволили выявить зависимости длины и шага расстановки армирующих элементов от глубины сжимаемой толщи массива слабого грунта. При малой длине армирующих элементов, в пределах сжимаемой толщи, наблюдаются деформации основания, превышающие допустимые пределы. Также увеличение шага расстановки армирующих элементов приводит к повышению деформации в фундаментной плите.

5. Результаты исследования вертикально армирующих элементов на реальном объекте позволили увеличить несущую способность основания и снизить деформативность в 3 раза, что в значительной степени сократит время и затраты, необходимые для создания искусственных оснований.

6. Применение раскатного оборудования при устройстве буронабивных вертикально армирующих элементов является перспективным и надежным методом обеспечения несущей способности и деформируемости основания. Создание уплотненной зоны при раскатке диаметром больше размера армирующего элемента увеличивает жесткость грунта в межэлементном пространстве, что намного повышает несущую способность основания.

7. Однако следует отметить, что отсутствие учета пластических свойств грунтов в пространстве между армирующими элементами позволяет провести только качественную оценку с целью выявления необходимости внесения изменений в конструктивные решения плитного фундамента, для исключения зон высоких концентраций напряжений.

8. Перспективой дальнейших экспериментов будут исследования пространственной работы системы «армирующий элемент – межэлементное грунтовое пространство» для определения оптимальных конструктивных решений армирования геомассива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Usmanov R., Mrdak I., Vatin N., Murgul V. Reinforced soil beds on weak soils. *Applied Mechanics and Materials.* 2014;633-644:932-935. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM. 633-634.932

2. Yushchube S.V. Podshivalov I.I. Stress-strain state model of split-level foundation of multi-storey building on a slope. *Journal of Construction and Architecture*. 2023;25(5): 164–178.

3. Kryzhanovskiy A.L., Rubtsov O.I. Reliability of design solutions of foundation slabs of high-rise buildings. *Vestnik MGSU*. 2006;1:191–198.

4. Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Stress-strain state finite element modeling of concrete foundation of a multistory brick building. *Journal of Construction and Architecture*.2021;23(2):118–132.

5. Katzenbach R., Schmitt A., Ramm H. Basic principles of design and monitoring of high-rise buildings of Frankfurt am Main. *Urban reconstruction and geotechnical construction*. 2005;9:80–99.

6. CN PK EN 1997-2:2007/2011. GEOTECHNICAL DESIGN. Part 2. Ground investigation and testing. February 2009.

7. State standards in the field of architecture, urban planning and construction. Regulatory and technical manual of the republic of Kazakhstan Designing and arrangement of foundation reinforcement with vertical reinforcing elements. NTP RK 07-01.3-2011. Astana 2015.

8. Alani A.M., Aboutalebi M. Analysis of the subgrade stiffness effect on the behaviour of ground-supported concrete slabs. *Structural Concrete*. 2012; 2(13):102-108. https://doi.org/10.1002/suco.201100043

9. Simões J., Neves L., Armando A., Guerra N. Reliability assessment of shallow foundations on undrained soils considering soil spatial variability. *Computers and Geotechnics.* 2020;119:103369. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103369

10. Mangushev R.A., Nguyen K.H. Comparisons of the calculation of the precipitation of buildings by various methods in the presence of layers of weak soils at the base. *Vestnik MGSU*. 2008;119-123.

11. Marinichev M.B., Tkachev I. G. Development of constructive solutions vertical reinforced bases of slab foundation of high-rise buildings in seismic areas. *Journal construction and architecture*. 2016;4:37–44.

12. Makovetsky O. A. *Calculation and construction of an artificial foundation "structural geotechnical array"*. Doctor of Science. Russian University of Transport; 2021.

13. Popov A.O. Settlement calculation of clay bed reinforced with vertical elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2015;4:19–27.

14. Semet C. Comparison of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models' Numerical Estimation of Ground Surface Settlement Caused by Tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*. 2017;4:95-102.

15. Madhira R. M., Hormoz B. P. A new model for geosynthetic reinforced soil. *Computers and Geotechnics*. 1988;6:277-290.

16. Lina J., Yehya T., Fadi H.C., Yasser E. Effect of Soil - Structure Interaction Constitutive Models on Dynamic Response of Multi-Story Buildings. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2018;11:56-60.

17. Bessimbayev Y., Zhambakina Z., Niyetbay S. Ensuring the seismic resistance of a building using a geotechnical seismic insulating screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022; 3. https://doi:10.15587/1729-4061.2022.260035

18. Amjad H.B., Shahnawaz Z., Ghulam S.B., Muhammad A.Z., Riaz B., Bashir A.M., Muhammad M.B. Mohr-Coulomb and Hardening Soil Model Comparison of the Settlement of an Embankment Dam. Engineering. *Technology & Applied Science Research*. 2019;9:4654-4658.

19. Golubev A.I., Selection of soil model and its parameters in calculations of geotechnical objects. *Proceedings of the International Conference on Geotechnics, Geotechnical problems of megacities. GEOMOS 7-10 June*. 2010;5:1727–1732.

20. Bessimbayev Y.T., Niyetbay S.E., Awwad T., Kuldeyev E.I., Uderbayev S.S., Zhumadilova Z.O., Zhambakina Z.M. The Creation of Geotechnical Seismic Isolation from Materials with Damping Properties for the Protection of Architectural Monuments. *Buildings*. 2024;14:1572. https://doi.org/10.3390/buildings14061572

21. Fenton G., Naghibi F., Griffiths D. On a unified theory for reliability-based geotechnical design. Computers and Geotechnics., September 2016;78:110-122. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X16300866

22. Cajka, R., Marcalikova, Z., Bilek, V., Sucharda, O. Numerical Modeling and Analysis of Concrete Slabs in Interaction with Subsoil. *Sustainability*. 2020;12(23): 9868. https://doi.org/10.3390/su12239868

23. Acharya M., Acharya I. Reliability Analysis of Bearing Capacity of Shallow Foundation on c- φ Soil. *Journal of Advanced College of Engineering and Management*. 2019;12:71-78. https://www.nepjol.info/index.php/JACEM/article/view/26690

24. Soubra A., Massih D.Y. Reliability-Based Analysis and Design of Foundations Resting on a Spatially Random Soil. *Publication: GeoCongress*.2008; Jun 20; 2012. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40971(310)10

25. Benramdane Y., Blom J., Ghalandari M. To what extent do software programs comply with Eurocode 7 with regard to the bearing capacity of strip foundations. University of Antwerp, Faculty of Applied Engineering, *EMIB Research Group, Groenenborgerlaan* 171, B-2020 Antwerp. https://data.fine.cz/handbooks-chapter-pdf/software-programs-comply- eurocode7-bearing-capacity-strip-foundations.pdf

26. Xue J., Nag D. Reliability analysis of shallow foundations subjected to varied inclined loads. Geotechnical Safety and Risk. ISGSR 2011. Karlsruhe: *Bundesanstalt für Wasserbau*. 2011;377-384. https://hdl.handle.net/20.500.11970/99587

27. Degtyarev V. G., Safronova T. I., Kozhenko N. V., Molotkov G S. Engineering method for calculating the slab foundation of a high-rise building in difficult geological conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;698(2)022014. https://doi:1010.1088/1757-899X/698/2/022014

28. Samorodov A.V., Nikulin V.B., Krotov O.V., Khrapatova I.V. Stress-strain analysis the condition of the pile-slab foundation a multi-storey building using sofistik software package. *Kharkiv National University of Construction and Architectur*e. Kharkiv, Ukraine. https://pssbim.ru/files/lists/News/759_UseFiles_1476358999_Analiz-NDS-svayno-plitnogo-fundamenta-mnogoetazhnogo-zdaniya-s-pomoschyu-PK-SOFiSTiKdoc.pdf

29. Gilemkhanov R.A., Alisher A. Assessment of the stress-strain state of the foundation plate, taking into account karst failures in the SCAD Office environment. *Construction of unique buildings and structures*. 2016;4(43):18-33.

30. Batalov S.N. Kulikov R.G. Salmin I.A. Determination of the sediment of the foundation plate in GeoPlate *Pro. Scientific, Technical and Industrial Journal of Construction*. 2019;11:10.

31. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. The results of modeling the stress-strain state of an adjustable foundation and a soil foundation in the ansys workbench software package. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University*, 2015; 4:76-88.

32. Ter-Martirosyan Z.G., Strunin P.V. Strengthening weak soils in the basis of foundation slabs with use of technology of jet grouting. *Bulletin MGSU*. 2010; 4:310-83158.

33. Kuanyshbay A., Niyetbay S., Tashmukhanbetova I., Sadyrov R., Amangeldi N., Mustafa L., Nurakhova A., Rustemov I., Yesbolat A. Optimized Development of High-Porosity Structural and Thermal Insulation Foam Ceramics Based on Local *Natural and Technogenic Raw Materials. Ceramics*. 2025,8:35. https://doi:10.3390/ceramics8020035

34. Mirsayapov I.T., Mustakimov V.R. Investigation of the strength and deformability of subsidence soil bases reinforced with vertical elements. “Interaction of structures and foundations: calculation methods and engineering practice”: *Proceedings of the International Conference on Geotechnics*. Volume 2. St. Petersburg State University. 2005;40-45.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аленов Канат Табынович – докторант PhD, Институт инженерии и технологий, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан, Alenov@korkyt.kz, https://orcid.org/0009-0007-4907-8027

Бесимбаев Ерик Турашович – доктор технических наук, Институт архитектуры и строительства, КазНИТУ имени Сатпаева, Алматы, Казахстан, y.bessimbayev@satbayev.university, https://orcid.org/0000-0002-0869-3513

Бисенов Кылышбай Алдабергенович – доктор технических наук, Кызылординский открытый университет, Кызылорда, Казахстан, Bisenov_KA@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0167-3560

Шадкам Ассильбек Сафарәлиулы – докторант PhD, Институт архитектуры и строительства, КазНИТУ имени Сатпаева, Алматы, Казахстан, Asylbekshadkam@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5759-0337

Ниетбай Саят Ержанулы – доктор PhD, ассоциированный профессор, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, s.nietbay@mok.kz, https://orcid.org/0000-0002-9748-6830

Молдамуратов Жангазы Нуржанович – доктор PhD, профессор-исследователь факультета общего строительства, Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан, доцент высшей школы передовых цифровых технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, zhanga_m_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4573-1179

ВКЛАД АВТОРОВ

Аленов К.Т. – написание статьи; научное редактирование текста; выявление зависимостей; проведение экспериментальной части исследования.

Бесимбаев Е.Т. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; научное редактирование текста; итоговые выводы.

Бисенов К.А. – подготовка образцов; написание статьи; обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Шадкам А.С. – подготовка образцов; написание статьи; обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Ниетбай С.Е. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Молдамуратов Ж.Н. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 08.04.2025; принята к публикации 12.04.2025.



WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Wuhan University of Technology (WUT), is a state key university directly affiliated to the Ministry of Education of the People's Republic of China. WUT is among the first batch of universities which have entered the national "211 Project" and China's "Double-First Class" Initiative. WUT is jointly developed by the Ministry of Education and the Ministry of Transport. As the university directly affiliated to the Ministry of Education which cultivates the largest number of talents in three major industrial sectors, namely, building and construction materials, transportation, and automobile industries, WUT becomes an important base for the cultivation of high-level scientific talents and technological innovation for the three industrial sectors.

WUT has three campuses, including Mafangshan campus, Yujiatou campus and the South Lake campus, with a total land area of 2.67 million square meters and a total gross floor area of 1.95 million square meters. Currently, WUT has over 50,000 faculty and students, 24 academic schools, 4 National Technology Innovation Bases and 4 modern libraries with a collection of 3.61 million books. Since 2000, WUT has been awarded over 20 national science and technology prizes, ranking in the forefront of all Chinese colleges and universities. In 2019, WUT was listed in Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

Since the founding of New China, WUT has cultivated more than 600,000 senior professionals. In the past decade, the first-time employment rate of graduates has

remained above 95%, and about 55% of total employment join world's top 500 enterprises and fields of strategic emerging industries.

Over the years, WUT has formed educational ideology system with distinctive characteristics, with the lofty ideal of "Building an excellent university to win worldwide recognition and admiration", the spirit of "Sound in morality, broad in learning and pursuing excellence", the principle of "Taking students' cultivation as our essence, and taking academic development as our priority", and the educational concept of "Implementing excellent education, nurturing excellent talents and creating an excellent life". Guided by the WUT Charter approved by the Ministry of Education, WUT is committed to the modernization of the governance system and capability, aiming to rank among the world-class universities with distinctive features.

MSE Discipline of Wuhan University of Technology

Founded in 1958, the Materials Science & Engineering (MSE) discipline of Wuhan University of Technology (WUT) was supported in priority through the "State 211 Project for Higher Education Universities" from 1995 to 2015, and has been supported via the "World-Class University & World-Class Discipline" development plan of China since 2016. WUT's MSE ranks A+ among 172 leading universities in China (No.1 alongside MSEs of Tsinghua University and Beihang University) in the 4th round national discipline evaluation organized by the Ministry of Education in 2017, and is world top 1‰ in Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

WUT's MSE owns 1 member of Chinese Academy of Sciences, 3 members of Chinese Academy of Engineering, 3 members of Academia Europaea, 1 member of the Royal Academy of Belgium, 1 member of the World Academy of Ceramics, 1 fellow of the Australian Academy of Technology and Engineering, 10 fellows of the Royal Society of Chemistry, American Physics Society and American Ceramic Society. It also owns 23 national high-level talents including recipients of the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (equal of NSF Career Awards), and 22 national high-level young talents.

WUT's MSE has established 2 state key laboratories, the State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing and the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures. The State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing was evaluated "Excellence" among 21 state key laboratories in MSE in 2018. It also has built 2 state international joint-research laboratories, and 4 bases of foreign outstanding expertise-introduction for discipline innovation (also known as "111 Project").

International School of Materials Science and Engineering

The International School of Materials Science and Engineering (ISMSE) was selected into the list of "Network of International Centers for Education" supported by the State Administration of Foreign Experts





Affairs and Ministry of Education of P. R. C. in June 2015 as one of the 16 international schools all over the country.

Driven by the "National innovation driven development strategy" and the great demand for national higher education reformation, ISMSE is devoted to building a world-leading MSE discipline through optimizing a high-level research and teaching team, constructing an innovative training pilot zone and establishing an innovative talents training system. Guided by the idea of "enterprise cooperation, international cooperation and research cooperation", ISMSE organized 21 mentor teams lead by academicians or distinguished professors and 4 interdisciplinary innovation and entrepreneurship training teams.

Aiming at leading the world's building materials and new materials in the 21st century, ISMSE values the innovative ability as one of the core capabilities and reform the innovative talent training system of the bachelor program, master and PhD program and international program. ISMSE provides students with a comprehensive curriculum, which covers materials science, life science, energy science, environmental science, information science and advanced manufacturing science. To expose all students to international experiences, joint training programs were created in cooperation with world-leading universities. Furthermore, ISMSE built a variety of platforms for students' all-round development, such as Distinguished Scholars Forum, International Vision Forum, Quality Education Seminar and Material Advantage WUT Chapter. The Material Advantage WUT Chapter was awarded Chapter of Excellence Award in the past 5 years from 2018 to 2022.

State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing (Wuhan University of Technology)

The State Key Laboratory of Advanced Technology for Material Synthesis and Processing was approved by the State Development Planning Commission in 1987. After state inspection, it was opened for the public in March 1990. The laboratory is under the direct administration of the Ministry of Science and Technology. Currently, Professor Gu Binglin, an academician of the Chinese Academy of Sciences, is the Chair of the laboratory's academic committee, and Professor Fu ZhengYi, an academician of the Chinese Academy of Engineering, is the Director of the laboratory. The laboratory is located in the Wuhan University of Technology, and it is a state key laboratory that specializes in the field of new materials. The Department of Materials Science and Engineering at the Wuhan University of Technology has been classified as a first-class State Key Discipline, included in the national "985" project of "Build a world-class discipline program," and is ranked as A+ in the fourth round of national discipline evaluation. Aiming at the global frontier research of materials science and addressing the primary national needs, this laboratory provides a world-class platform for materials compounding and preparation technology, for developing advanced composite materials for national major projects and pillar industries, and for providing support at the national strategic level. Original and systematic research results, with international impact in transformative technologies, frontier new materials, and interdisciplinary fields, have been reported in this

laboratory, and therefore, it leads the international development in several strategic frontier new materials. The laboratory fosters the development of global first-class research talent through advanced scientific research in the field of materials science and technology. In addition, the laboratory has created a culture of international collaborative innovation and has carried out "Win-Win" international cooperative research, thereby enhancing the international influence, attractiveness, and cohesion of the laboratory. The laboratory has achieved a historic breakthrough in the evaluation of the State Key laboratories in the field of materials science.

Centering on the overall vision and objectives, the laboratory focuses on the establishment and development of multi-component, multi-scale, and multi-level composite principles and material design theories that are built on core research platforms comprising material gradient composite technology, in-situ composite technology, nanocomposite technology, and their integrated innovations. Currently, research on five key materials, including advanced composite materials for national major projects and pillar industries, efficient energy conversion and storage materials for new energy technologies, nanocomposite biomaterials for life sciences, information functional materials for information technology, and frontier new materials for transformative technologies, is being carried out in this laboratory. Therefore, the laboratory has established the following five distinctive research directions: gradient composite technology and new materials, in-situ composite technology and new materials, nanocomposite technology and new materials, transformative technology and frontier new materials, and material composite principles and material design.

The laboratory has an active and innovative research team that mainly comprise young and middle-aged researchers. There are hundred permanent staff members, including one academician of the Chinese Academy of Sciences, two academicians of the Chinese Academy of Engineering, one academician of the Royal Academies for Science and the Arts of Belgium, two academicians of the European Academy of Sciences and Arts, one academician of the Australian Academy of Technology and Engineering, one academician of the World Academy of Ceramics, twelve national level researchers, one chief scientist of the National "973" program, five recipients of the national "Outstanding Youth Science Fund," and thirty recipients of the "national talent Support Plan". etc. This laboratory has been actively supporting outstanding scholars to visit and conduct collaborative research worldwide in world-class universities and research institutions. In recent years, the laboratory has sent several outstanding young scholars to world-class international universities for more than one year to conduct visits and collaborative research.

The laboratory emphasizes global academic exchange and collaboration. In the last five years, we have hired twenty-five international scholars as honorary and visiting professors in the main research areas, with an aim to create cordial working conditions for world-renowned scientists to conduct collaborative research in the laboratory.

The laboratory has carried out substantial "Win-Win" collaborations with the University of Michigan; Japan





Aerospace Exploration Agency (JAXA); the Institute for Materials Research, Tohoku University (Japan); the Materials Research Center, University of Oxford (UK); Composites Research Center, the University of California (US); and the National Institute of Fuel Cells (Canada), among other internationally renowned research institutions. The Ministry of Science and Technology has established the "International Joint Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing," which is one of the first thirty-three international joint laboratories in China. Additionally, the State Administration of Foreign Experts Affairs and the Ministry of Education have jointly formed three discipline bases supported by the Program of Innovation and Talent Introduction, namely "New Material Composite Technology and Advanced Functional Materials," "Advanced Preparation Technology and Application Engineering of New Functional Thin Film Materials," and "Innovation and Talent Introduction Base of Life Composites." Relying on these important international collaboration platforms, the laboratory has undertaken several state key projects with international collaborations and achieved fruitful results in international collaboration and exchanges.

Currently, the laboratory has a floor area of 25,350 square meters, with several advanced materials synthesis and processing instruments, as well as state-of-the-art instruments specializing in materials structure analysis, characterization, and performance testing. The total estimated value of the instrumentation asset is approximately 430 million RMB.

Introduction to the State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture

The State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture was authorized by the Ministry of Science and Technology of China (MoST) in October 2011, and passed the expert acceptance of MoST in July 2013. The laboratory aims to solve the major fundamental theories and common key technology issues during the preparation and service process of silicate materials for architectures, develop low environmental load preparation methods and energy efficiency enhancement theories, research and develop high performance and multifunctional building materials to support major engineering construction and the development of green, energy-saving and intelligent building systems, and provide new theories, new methods and common key technologies for achieving long-term stability and recycling of building materials and structures.

The main research directions of the laboratory comprise the low environment load preparation, the functional design and regulation, the service behavior and life extension principles as well as the recycling design of silicate materials for architecture.



The Laboratory shares a construction area of 12 500 m² and lots of professional research equipment worth more than 100 million RMB, forming a research platform including eight professional secondary laboratories and one public experiment center. The research platform is able to support the research of the science and technology in the field of thermal equipment, cement and cementitious materials, concrete, glass, ceramics, film and coating, wall and road materials.

The Laboratory is open to both domestic and international applications, and values domestic and international academic exchanges and cooperation. Relying on the laboratory, the "International Science and Technology Cooperation Base for Environmental Friendly Building Materials" was established and was identified as a model of international science and technology cooperation base by MoST in 2013.

The innovation achievements of scientific research of the laboratory contribute a lot to the national economy and social development, including providing key technical support for the construction of national major infrastructures, boosting the structural transformation and technological upgrading of traditional building materials industry, and promoting the implementation of energy saving and emission reduction strategies.

Introduction to Interdisciplinary Materials

The scientific journal Interdisciplinary Materials (ISSN: 2767-441X) was launched by Wuhan University of Technology and John Wiley & Sons, Inc in Dec, 2021.

Interdisciplinary Materials is an open-access, peer-reviewed, and rapid-publication journal focusing on the interdisciplinary researches between materials science and other disciplines, such as physics, chemistry, mathematics, mechanics, biology, energy, environment, information, engineering, etc. The journal aims at reporting cutting-edge developments across science and technology around the world.

Interdisciplinary Materials is expected to take an interdisciplinary, frontier, and integrated approach to all areas of materials research while cultivating the exchange of ideas between scientists involved in the different disciplines. Readership includes physicists, chemists, mathematicians, mechanics, biologists, and energy, environment, materials scientists, engineers from academia and industry as well as policymakers.

The first issue was published in Jan, 2022. It has been included in the Emerging Sources Citations Index (ESCI), Ei Compendex and Directory of Open Access Journals (DOAJ) databases.

Contact information

Address: 122 Luoshi Road, Hongshan District, Wuhan, Hubei, P. R. China
Postal Code: 430070
Supporting Institution: Wuhan University of Technology
Tel: 86-27-87884448; Fax: 86-27-87879466
E-mail: sklwut@whut.edu.cn
Contacts: Zhao Xiang, Zhou Lihua

R



УХАНЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Уханьский технологический университет (УТУ) – национальный стратегический университет под прямым управлением Министерства образования. Является одним из первых университетов, вошедших в государственные программы «211 Project» и «Double-First Class» для содействия развитию университетов и научных направлений мирового уровня. УТУ был образован Министерством образования совместно с Министерством транспорта. Так как университет подчиняется напрямую Министерству образования, которое растит и развивает талантливые кадры в области строительства и строительных материалов, транспорта и автомобилестроения, УТУ стал важным центром по подготовке научных кадров и технологических инновационных разработок для этих трех крупнейших промышленных секторов.

Университет включает 3 кампуса: Мафангшан, Юдзитау и СауфЛейк, в общей сложности занимающих площадь 267 гектаров общей площадью зданий 1,95 млн м^2. В настоящее время в УТУ работают более 50 тыс. человек персонала и студентов, 24 академические школы, 4 Национальных технологических инновационных центра и 4 современные библиотеки с фондом в 3,61 млн изданий. С 2000 года УТУ удостоился 20 государственных национальных научных и технических премий, занимая первые позиции в рейтинге всех китайских университетов и колледжей. В 2019 году УТУ был включен в рейтинги Times Higher Education World University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings, Shanghai Jiao Tong University's Academic Ranking of World Universities and QS Asia University Rankings.

С момента образования Нового Китая УТУ подготовил более 600 тыс. высокопрофессиональных специалистов. В течение последних десяти лет процент впервые трудоустроенных выпускников остается свыше 95% и составляет около 55% от всех трудоустроенных выпускников в международном рейтинге «Top 500 компаний и новых отраслей».

На протяжении многих лет УТУ сформировал отличительную идеологию системы образования с высокими идеалами «Построения отличного университета для завоевания всемирного признания и восхищения», следуя девизу «Быть нравственно непоколебимым, разносторонним в учении, стремящимся к совершенству», а также принципу «Сделать воспитание студентов нашей сущностью, а академическое развитие – приоритетом». Университет воплощает образовательную концепцию «внедрение отличного образования, воспитание первоклассных кадров и создание прекрасной жизни». Руководствуясь Хартией УТУ, утвержденной Министерством образования, УТУ вовлечен в модернизацию системы государственного регулирования с целью занять свое место среди университетов мирового уровня с отличительными признаками.

Здание корпуса научного направления «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) Уханьского технологического университета

Основанное в 1958 году в УТУ научное направление «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) приоритетно поддерживалось государственной программой «211 проектов для университетов» («State 211 Project for Higher Education Universities») в период с 1995 по 2015 годы, а с 2016 года поддержка стала осуществляться через план развития КНР «Университеты мирового уровня и научные направления мирового уровня» («World-Class University & World-Class Discipline»). Рейтинг этого направления составляет A+ среди 172 ведущих университетов в Китае (№ 1 наравне с этим направлением в университетах Тцинхуа и Бейхан) в 4-ом раунде оценки, организованном Министерством образования в 2017 году, а также входит в топ 1% в международный системе Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

В развитие МИД вовлечены: 1 член Китайской академии наук, 3 члена Китайской инженерной академии, 3 члена Европейской академии, 1 член Бельгийской королевской академии, 1 член Международной академии керамики, 1 стипендиат Австралийской академии технологий и инженерии, 10 стипендиатов Королевского химического общества, Американского общества физики и Американского общества керамики. Также в МИД работают 23 китайских высокопрофессиональных сотрудника, некоторые из которых являются стипендиатами Национального фонда National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (аналогичен премии NSF Career Awards), и 22 китайских молодых специалиста.

Для содействия развитию научного направления МИД были основаны 2 государственных ключевых лаборатории: Государственная ключевая лаборатория передовых технологий синтеза и обработки





материалов и Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры. Первая лаборатория получила оценку «превосходно» среди 21 государственной ключевой лаборатории по МИД в 2018 году. Помимо этого, были построены 2 государственных международных лаборатории для совместных исследований и 4 базы внедрения зарубежных компетенций как инновационного составляющего научной области (известный как «111 Project»).

Международная школа материаловедения и инженерии

Международная школа материаловедения и инженерного дела (МШМИД) была включена в список «Сети международных образовательных центров» при поддержке Государственной администрации КНР по делам иностранных экспертов и Министерства образования КНР в июне 2015 года как одна из 16 международных школ по всей стране.

Руководствуясь «Национальной стратегией развития, ориентированной на инновации» и большую потребность в реформировании национальной системы высшего образования, МШМИД стремится создать ведущее в мире направление МИД путем привлечения исследовательского и преподавательского состава высокого уровня, создания инновационной пилотной зоны обучения и формирования инновационной системы подготовки талантов. Руководствуясь идеями «сотрудничества предприятий, международной кооперации и сотрудничества в области исследований», МШМИД организовала 21 группу наставников под руководством ученых или видных профессоров, а также 4 междисциплинарные группы по обучению инновациям и предпринимательству.

Стремясь стать ведущим мировым разработчиком строительных материалов и новых материалов в 21 веке, МШМИД оценивает инновационные способности как одну из ключевых возможностей и проводит реформирование инновационной системы подготовки кадров в рамках программы бакалавриата, магистратуры и докторантуры, а также международной программы обучения. МШМИД предлагает студентам всеобъемлющую учебную программу, которая охватывает материаловедение, естественные науки, отраслевые энергетические науки, науки об окружающей среде, информатику и изучение передовых производственных технологий. Чтобы познакомить всех студентов с международным опытом, реализуются совместные программы обучения в сотрудничестве с ведущими мировыми университетами. Кроме того, при МШМИД создано несколько платформ для всестороннего развития студентов, таких как Форум выдающихся исследователей, Международный форум по видению будущего развития, Семинар оценки качества образования, Студенческое научное общество (СНО) материаловедения Уханьского технологического университета. СНО материаловедения пять лет подряд с 2018 по 2022 год удостаивается награды Chapter of Excellence Award.

Государственная стратегическая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов (Уханьский технологический университет)

Государственная ключевая лаборатория перспективных технологий синтеза и обработки материалов была утверждена Государственной комиссией планирования развития в 1987 году. После государственной инспекции она была открыта для общественности в марте 1990 года. Лаборатория находится в непосредственном ведении Министерства науки и технологии. В настоящее время профессор Гу Бинлинь, академик Китайской академии наук, является председателем академического Комитета лаборатории, а профессор Фу Чжэн И, академик Китайской инженерной академии, является директором лаборатории. Лаборатория расположена в Уханьском технологическом университете и является ключевой государственной лабораторией, специализирующейся в области новых материалов. Факультет материаловедения и инженерного дела Уханьского технологического университета был классифицирован как первоклассное государственное ключевое научное направление, включенное в национальный проект «985», «Создание учебной программы мирового уровня» и получил оценку A+ в четвертом раунде национальной оценки научных направлений. Стремясь к глобальным передовым исследованиям в области материаловедения и удовлетворяя основные национальные потребности, эта лаборатория представляет собой платформу мирового класса для технологии компаундирования и подготовки материалов, для разработки передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и отраслей промышленности, а также для оказания поддержки на национальном стратегическом уровне. Лаборатория сообщила об оригинальных и систематических результатах исследований с международным участием в области трансформационных технологий, передовых новых материалов и междисциплинарных областей, и поэтому она возглавляет разработку нескольких стратегических передовых новых материалов на международном уровне. Лаборатория способствует развитию первоклассных исследовательских талантов во всем мире посредством передовых научных исследований в области материаловедения и технологий. Кроме того, лаборатория создала культуру международных совместных инноваций и провела международные совместные исследования по принципу «win-win», тем самым укрепив международное влияние, привлекательность и сплоченность лаборатории. Лаборатория добилась исторического прорыва по оценке ключевых государственных лабораторий в области материаловедения.



Сосредоточившись на общем видении и целях, лаборатория фокусируется на создании и разработке многокомпонентных, разномасштабных и многослойных композитных материалов и теории проектирования материалов, изучение которых строится на основных исследовательских платформах, включающих технологию градиентных композитных материалов, технологию изготовления композитных материалов «в момент образования», нанокомпозитную технологию и интегрированные инновации. В настоящее время проводятся исследования пяти ключевых материалов, в том числе передовых композитных материалов для крупных национальных проектов и опорных отраслей, материалов для эффективного преобразования и хранения энергии для новых энергетических технологий, нанокомпозитных биоматериалов для естественных наук, информационных функциональных материалов для информационных технологий и передовых новых материалов для трансформационных технологий. Таким образом, лаборатория установила следующие пять отличительных направлений исследований: градиентная композитная технология и новые материалы, технология изготовления композитных материалов «в момент образования» и новые материалы, нанокомпозитная технология и новые материалы, преобразующая технология и передовые новые материалы, а также принципы композитных материалов и дизайн материалов.

В лаборатории работает активная и инновационная исследовательская группа, состоящая в основном из молодых исследователей и исследователей среднего возраста. 100 постоянных сотрудников, в том числе 1 академик Китайской академии наук, 2 академика Китайской инженерной академии, 1 академик Королевской академий наук и искусств Бельгии, 2 академика Европейской академии наук и искусств, 1 академик Австралийской инженерно-технологической академии, 1 академик Всемирной академии керамики, 12 исследователей национального уровня, 1 главный научный сотрудник Национальной программы «973», 5 стипендиатов национального фонда



«Outstanding Youth Science Fund» и 30 стипендиатов «Национального плана поддержки талантов» и т.д. Лаборатория активно поддерживает выдающихся ученых, которые приезжают и проводят совместные исследования по всему миру в университетах и исследовательских институтах мирового уровня. В последние годы лаборатория направила несколько выдающихся молодых ученых в международные университеты мирового уровня более чем на один год для проведения совместных исследований.

Лаборатория делает упор на глобальный академический обмен и сотрудничество. За последние пять лет мы приняли на работу 25 зарубежных ученых в качестве почетных и приглашенных профессоров в основных областях исследований с целью создания благоприятных условий работы для всемирно известных ученых и проведения совместных исследований в лаборатории. Лаборатория наладила взаимовыгодное сотрудничество с Мичиганским университетом; Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA); Институтом материаловедения Университета Тохоку (Япония); Центром исследования материалов Оксфордского университета (Великобритания); Центром исследования композитов Калифорнийского университета (США) и Национальным институтом топливных элементов (Канада), а также с другими всемирно известными научно-исследовательскими учреждениями. Министерство науки и технологий создало «Международную совместную лабораторию передовых технологий синтеза и обработки материалов», которая является одной из первых 33 международных совместных лабораторий в Китае. Кроме того, Государственная администрация КНР по делам иностранных экспертов и Министерство образования совместно сформировали три научные базы, поддерживаемые Программой инноваций и развития талантов, а именно «Новые композитные материалы и передовые функциональные материалы», «Передовые технологии подготовки и прикладного проектирования новых функциональных тонкопленочных материалов» и «Инновации и таланты для увеличения срока службы композитов». Опираясь на эти важные платформы международного сотрудничества, лаборатория осуществила несколько ключевых государственных проектов с международным сотрудничеством и добилась плодотворных результатов.

В настоящее время площадь лаборатории составляет 25 тыс. 350 м^2, с оснащением современным оборудованием для синтеза и обработки материалов, а также самыми современными приборами для анализа структуры материалов, характеристики и тестирования производительности. Общая оценочная стоимость оснащения лаборатории составляет приблизительно 430 млн юаней.

Знакомство с Государственной ключевой лабораторией силикатных материалов для архитектуры

Государственная ключевая лаборатория силикатных материалов для архитектуры получила одобрение для открытия Министерством науки и техники Китая (МНТК) в октябре 2011 года, а в июле 2013 года прошла экспертизу МНТК. Лаборатория развивает основные фундаментальные теории и общие ключевые технологические вопросы в процессе разработки и во время срока службы силикатных материалов для архитектуры, разрабатывает методы производства с низкой нагрузкой на окружающую среду и теории повышения энергоэффективности, исследует и разрабатывает высокоэффективные и многофункциональные строительные материалы для поддержки основных инженерных конструкций, разрабатывает экологически чистые, энергосберегающие и интеллектуальные строительные системы, а также предлагает новые теории, новые методы и основные ключевые технологии для достижения долгосрочной стабильности и переработки строительных материалов и конструкций.

Основными направлениями работы лаборатории являются исследования для снижения нагрузки на окружающую среду, функциональное проектирование и регулирование, исследования «поведения» материалов во время срока службы и принципы продления срока службы, а также переработка силикатных материалов для строительства.

Лаборатория занимает площадь 12 500 м^2 и оснащена профессиональным исследовательским оборудованием стоимостью более 100 миллионов юаней, образуя исследовательскую платформу, включающую восемь профессиональных вторичных лабораторий и один общественный экспериментальный центр. Исследовательская платформа имеет мощности для проведения исследований в области науки и техники теплового оборудования, цемента и вяжу-



щих материалов, бетона, стекла, керамики, пленок и покрытий, стеновых и дорожных материалов.

Лаборатория доступна как для китайских, так и для международных заявок и нацелена на внутренние и международные академические обмены и сотрудничество. На базе лаборатории была создана «Международная база научно-технического сотрудничества в области экологически чистых строительных материалов», которая в 2013 году была определена МНТК в качестве модели международной базы научно-технического сотрудничества.

Инновационные достижения научных исследований лаборатории вносят большой вклад в национальную экономику и социальное развитие, включая предоставление ключевой технической поддержки для строительства основной национальной инфраструктуры страны, стимулирование структурных преобразований и технологической модернизации традиционной промышленности строительных материалов, а также содействие внедрению стратегий энергосбережения и сокращению выбросов.

Знакомство с журналом Interdisciplinary Materials

Научный журнал Interdisciplinary Materials (ISSN: 2767-441X) был запущен Уханьским технологическим университетом совместно с John Wiley & Sons, Inc в декабре 2021 года.

Interdisciplinary Materials – это рецензируемый журнал открытого доступа с быстрой публикацией статей, фокусирующийся на междисциплинарных исследованиях между материаловедением и другими дисциплинами, такими как физика, химия, математика, механика, биология, энергетика, окружающая среда, информация, инженерия и т. д. Журнал стремится представлять информацию о передовых разработках в области науки и техники по всему миру.

Ожидается, что Interdisciplinary Materials будет использовать междисциплинарный, особый передовой и комплексный подход ко всем областям материаловедения, одновременно способствуя обмену идеями между учеными, занимающимися различными направлениями исследований. Аудитория журнала будет включать ученых-физиков, химиков, математиков, механиков, биологов, специалистов в области энергетики, окружающей среды, материаловедения, инженеров-теоретиков и практиков, а также политических деятелей.

Первый выпуск журнала вышел в свет в январе 2022 года. Журнал включен в базы данных Emerging Sources Citations Index (ESCI), Ei Compendex и Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Контактная информация

Уханьский технологический университет
430070, Китай, провинция Хубей, г. Ухань,
район Хунгшан, 122 Луоши Роуд,
Тел: 86-27-87884448; Факс: 86-27-87879466
E-mail: sklwut@whut.edu.cn
Контактные лица: Джао Сянг, Джоу Лихуа

R

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS AND SCIENTISTS RESEARCH

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-179-188

CC BY 4.0

The photocatalytic activity of cement-sand plaster under the influence of natural solar radiation

Marina O. Dudareva*, Irina V. Kozlova, Olga V. Zemskova, Nikita S. Borisenkov
National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: modudareva@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Concrete and cement composites can be considered as the most demanded and versatile building materials nowadays. Recently, photocatalytic building materials containing nano- and finely dispersed oxides and salts photocatalyst particles, especially titanium dioxide of anatase modification, are becoming widespread. Under the influence of light, the surface of these materials becomes capable of self-cleaning. The materials photocatalytic activity is usually determined in the laboratory conditions by irradiating samples with an artificial source of light with certain wavelength, which does not fully characterize the behavior of the material in real-life conditions. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the photocatalytic activity of cement-sand plaster samples under natural solar radiation. **Materials and methods of research.** In this study, the properties of cement-sand plaster modified with an additive of industrial TiO_2 were studied. The additive was introduced into the plaster compositions in amounts of 0.3; 1.0; 1.7; 3.0; 5.0 and 10.0 wt.% during the dry mixing of the components. At the first stage, the effect of the additive on physical and mechanical properties of the samples was investigated. The second part of the research is devoted to the study of the photocatalytic properties of the material. Mineralization of the model pollutant Methylene blue was carried out in real-life conditions under sunlight irradiation, the photocatalytic activity of the samples was evaluated in accordance with the European standard UNI 11259-2016. **Results and discussion.** As a result of the study, the authors found that the maximal increase in compressive and flexural strength corresponds to the sample with 5.0 wt.% of TiO_2, and the maximum degree of Methylene blue decomposition corresponds to the sample with 10.0 wt.% of TiO_2. Thus, compressive strength increases by 69% at 2 days age, by 58% at 7 days age, and by 50% at 28 days age compared to the control sample. Flexural strength increases by 10, 13, and 50% at 2, 7, and 28 days age, respectively. The strength of the samples with 10.0 wt.% of TiO_2 remains approximately at the level of the control sample. Compositions with TiO_2 starting from 3 wt.% demonstrate photocatalytic activity (R), the highest R corresponds to 10 wt.% sample with R value is 40–78%. It is also noticeable that the maximum Methylene blue mineralization (58–78%) is observed after 2 days of sunlight irradiation, after 7 days there is a significant decrease in the degree of pigment decomposition. **Conclusion.** As a result of the research, the authors concluded that the optimal amount of TiO_2 photocatalyst in the cement-sand plaster is 5.0–10.0 wt.% since these samples exhibit maximum strength characteristics combined with a high ability of model contaminant degradation.

KEYWORDS: cement plaster, photocatalytic activity, industrial titanium oxide, anatase, sunlight irradiation, mineralization, Methylene blue

FOR CITATION:
Dudareva M.O., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Borisenkov N.S. The photocatalytic activity of cement-sand plaster under the influence of natural solar radiation. *Nanotechnologies in construction.* 2025;17(2):179–188. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-179-188. – EDN: XBEDTX.

© Dudareva M.O., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Borisenkov N.S.,2025

THE RESULTS OF THE SPECIALISTS AND SCIENTISTS RESEARCH

Фотокаталитическая активность цементно-песчаной штукатурки под воздействием естественного солнечного излучения

Марина Олеговна Дударева*, Ирина Васильевна Козлова, Ольга Викторовна Земскова, Никита Сергеевич Борисенков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: modudareva@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Бетон и разнообразные цементные композиты с уверенностью можно отнести к наиболее востребованным и универсальным строительным материалам. Не так давно широкое распространение получили фотокаталитически активные строительные материалы, содержащие в своей структуре частицы фотокатализаторов на основе нано- и тонкодисперсных частиц оксидов и солей некоторых металлов, в частности диоксида титана анатазной модификации. Под воздействием света поверхность таких материалов становится способной к самоочищению. Зачастую лабораторная оценка фотокаталитической активности материала сводится к облучению образцов искусственным источником света определенной длины волны, что недостаточно полно характеризует поведение материала при эксплуатации в реальных условиях окружающей среды. Поэтому целью данного исследования является оценка фотокаталитической активности образцов цементно-песчаной штукатурки в условиях облучения естественным солнечным светом в природных условиях. **Материалы и методы.** В рамках данной работы изучали свойства цементно-песчаной штукатурки, модифицированной добавкой промышленного диоксида титана анатазной модификации. Добавку вводили в штукатурные составы в количествах 0,3; 1,0; 1,7; 3,0; 5,0 и 10,0 масс.% в процессе сухого смешивания компонентов. На первом этапе исследовали влияние добавки на строительно-технические и физико-механические характеристики образцов. Вторая часть исследования посвящена изучению фотокаталитических свойств материала. Фотоокисление модельного загрязнителя Метиленового синего проводили в природных условиях под воздействием естественного солнечного излучения, фотокаталитическую активность образцов оценивали в соответствии с европейским стандартом UNI 11259-2016. **Результаты.** В результате проведенного исследования авторы установили, что наибольший прирост прочности при сжатии и изгибе соответствует образцу с 5,0% масс. добавки TiO_2, а максимальная степень разложения Метиленового синего характерна для образца с 10,0% масс. TiO_2. Так, прочность при сжатии возрастает на 69% во вторые сутки, на 58% в возрасте 7 суток и на 50% в марочном возрасте по сравнению с контрольным образцом. Прочность при изгибе увеличивается на 10; 13 и 50% во 2, 7 и 28 сутки, соответственно. Прочность образцов с большим количеством добавки остается примерно на уровне бездобавочного образца. Фотокаталитически активными являются составы с содержанием TiO_2 начиная с 3% масс., наибольшей активностью обладает 10%-ный образец, для которого значение R составляет 40–78%. Также заметно, что максимальная активность в отношении минерализации Метиленового синего (58–78%) наблюдается после 2 суток нахождения образцов в условиях естественного солнечного освещения, к 7 суткам наблюдается значительное снижение степени разложения пигмента. **Заключение.** В результате проведенных исследований авторы пришли к выводу, что оптимальным количеством фотокатализатора TiO_2 для введения в состав цементно-песчаной композиции является 5,0–10,0% по массе смеси, поскольку данные образцы проявляют максимальные прочностные характеристики в сочетании с высокой способностью к минерализации модельного загрязнителя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: штукатурка цементная, фотокаталитическая активность, промышленный оксид титана, анатаз, естественное солнечное освещение, обесцвечивание, метиленовый синий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Дударева М.О., Козлова И.В., Земскова О.В., Борисенков Н.С. Фотокаталитическая активность цементно-песчаной штукатурки под воздействием естественного солнечного излучения. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):179–188. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-179-188. – EDN: XBEDTX.

INTRODUCTION

The increase in the construction industry involves the creation of innovative multifunctional building materials. Research in the field of building materials science include the introduction of nanotechnology, the development of smart materials and structures with self-cleaning and self-restoring properties. The key role in the modern world is assigned to the problems of ecology and energy saving, occuring during the production and functioning of building materials and constructions. Special attention is paid to environmental aspects that affect the creation of

comfortable conditions in large cities with high pollution level [1–3].

One of the solutions to existing problems is the creation of photocatalytic building materials by adding photocatalysts particles into the composition of traditional building materials. Under the influence of natural solar radiation photocatalytic oxidation of organic and inorganic pollutants adsorbed on the surface occurs, as well as viruses, spores of microscopic fungi, algae and lichens. Photocatalysts can be used to modify building materials of various structure and origin, especially glass and cement compounds. In addition, particles of semiconductor oxide photocatalysts makes the surface of the material hydrophilic. Consequently the surface remains clean longer since pollutant molecules and their oxidation products are easily rinsed by rainwater [4–10].

Obviously, the modification of traditional building materials by photocatalysts can be considered as a large field of research in building materials science. This is confirmed by the increasing amount of published scientific articles, conference papers, dissertations and patents on the subject of photocatalysis process research in accordance with Russian Scientific electronic Library «elibrary» database (Figure 1).

The most common photocatalyst is titanium dioxide of anatase modification. Powdered TiO_2 has been widely used as a white pigment for centuries because it is cheap, chemically stable and nontoxic. However, scientists and engineers are constantly finding new applications for titanium dioxide: in the 1980s, it was first used for the photocatalytic production of hydrogen. In the late 1990s, photocatalysis was discovered and the ability of polycrystalline TiO_2 films to change the contact angle under the ultraviolet irradiation was discovered. Next TiO_2 was also used in construction to create materials with a self-cleaning effect due to the photocatalytic oxidation of pollutants adsorbed on the surface (Figure 2) [11–12].

Photocatalysis mechanism for semiconductor photocatalysts, such as titanium dioxide, has been described in details in Russian and foreign literature [13–15]. When a TiO_2 particle is irradiated with UV light, electrons in the valence band are activated and transferred to the conduction band to form electron-hole pairs. The electron and the electron vacancy then diffuse to the surface of the TiO_2 particle and promote oxidation-reduction reactions with the formation of reactive oxygen species (ROS), which can further react with adsorbed pollutants, bacteria and viruses, decomposing them into harmless compounds. TiO_2 belongs to wide-bandgap semiconductors with a band gap of 3.2 eV: this means that ROS formation occurs only at radiation wavelength less than 400 nm, that is, in the ultraviolet part of the spectrum.

The self-cleaning ability is especially relevant for finishing materials. The most popular are facade plasters based on white cement, where it is crucial to maintain surface whiteness and to prevent biofouling. In this case, the best solution would be to introduce a photocatalyst additive into plaster composition.

The most well-known photocatalyst nowadays is the nanostructured TiO_2 Degussa P25, which is a mixture of anatase and rutile at 20–30% [16, 17]. However, due to its high price and inaccessibility in the Russian Federation, it is necessary to search for alternative additives. In this

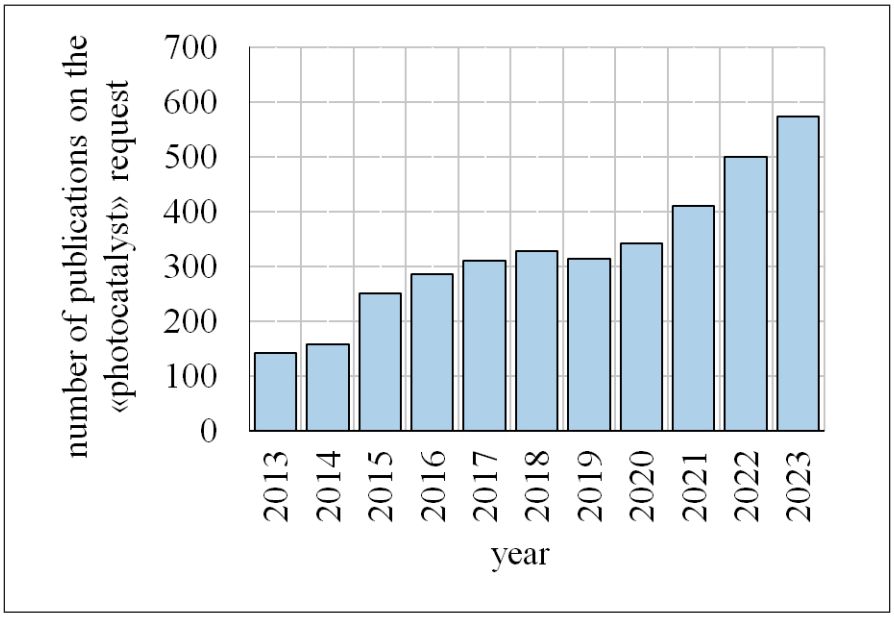


Fig. 1. Publication activity on the «photocatalyst» request in the Russian Scientific electronic Scientific Library «elibrary» database

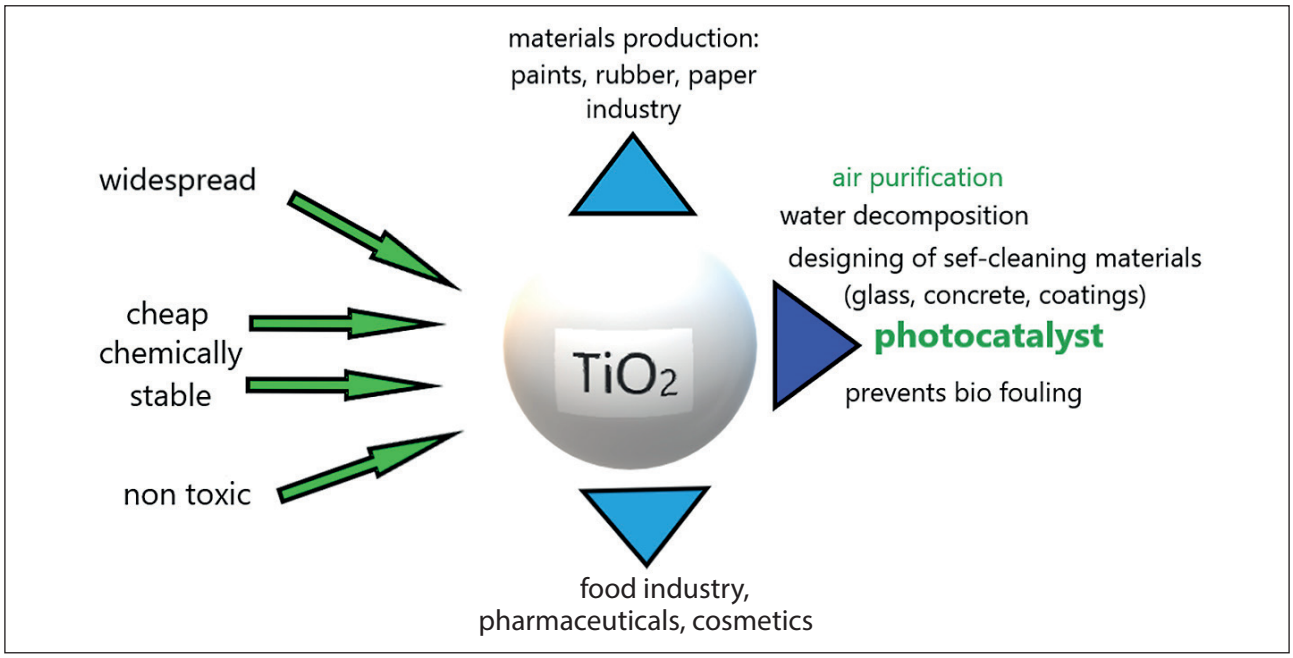


Fig. 2. TiO_2 application

work the authors chose industrial titanium oxide TiO_2 (anatase) TA-100 manufactured in China.

Industrial photocatalysts are usually highly dispersed powders that are introduced into dry building mixes during the dry mixing of components or as a suspension instead of mixing water. In order to achieve self-cleaning effect, it is necessary to introduce a photocatalyst into the cement composition up to 1–10 wt.%, which affects physical, mechanical and structural properties of modified cement material [18–20]. Thus, one of the objectives of this work was to study the influence of the TiO_2 additive on the mobility and strength characteristics of cement-sand plaster samples. The photocatalytic activity of the samples was also determined as part of this study. The simplest and most visual methods for assessing R of the modified materials is the European standard UNI 11259-2016 [21], based on fixing the discoloration process of the organic pigment Rhodamine B applied to the surface of the samples after 4 and 26 hours of irradiation from a light source with a certain wavelength. However, a number of studies indicate the possibility of using other organic dyes, such as, methylene blue, malachite green, methyl orange, etc. [22–24]. Samples can be considered photocatalytically active if the degree of model contaminant decomposition after 4 and 26 hours of exposure exceeds 20% and 50% respectively.

As a rule, study of photocatalytic activity are laboratory tests with an artificial source of light of certain wavelength not considering real-life conditions such as climate zone, temperature and illumination daily changes, clouds, precipitation, and the geographical location of the samples. In addition, the intensity of ultraviolet radiation depends on the local climate, but usually accounts for about 5.5% of global solar radiation. Thus, the behavior of self-cleaning plaster compositions modified by the photocatalyst at real-life conditions may differ significantly from the results obtained during the laboratory tests. Thus, **another step in this study** was to conduct real-life tests of cement-sand plaster modified with anatase TiO_2 to assess its photocatalytic activity. The main task of the article was to determine the optimal TiO_2 concentration capable of providing the highest strength and photocatalytic characteristics.

MATERIALS AND METHODS

In this work, to obtain samples modified with industrial titanium oxide, we used Cemix PRO WHITE cement PCB 1-500-D0 from Cemix LLC, its chemical and mineralogical composition is shown in Tables 1 and 2, white quartz sand of 0.1-0.4 mm fractions (Table 3). As a photocatalytic additive industrial anatase titanium oxide TiO_2 TA-100 (China) was selected with characteristics presented in Table 4.

At first, it was necessary to determine W/C to prepare samples for the study of strength and photocatalytic characteristics. For this purpose, the mobility of cement-sand mortar with TiO_2 additive was determined according to GOST 310.4. Sand : cement ratio was 3:1 (mass), fine photocatalyst powder was added in amounts of 0.3; 1.0; 1.7; 3.0; 5.0 and 10.0 wt.%, the amount of mixing water corresponded to a consistency characterized by a cone spreading of 106-115 mm. Next, samples of a 40×40×160 mm were prepared from a cement-sand

Table 1. Chemical composition of clinker

Component	Oxide content, %							
	Calcination loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	R_2O
Clinker	1.0	21.0	5.5	0.5	65.0	1.0	3.3	0.1

Table 2. Mineralogical composition of clinker

Clinker	Mineral content, %			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Content	66.0	8.5	13.5	1.5

Table 3. Characteristics of sand

Bulk density, g/cm³	Specific density, g/cm³	Average grain size, μm	Oxide content, %							
			Clay	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	TiO_2
1.403	2.637	235.23	0.10	99.857	0.130	0.026	–	0.003	0.021	0.018

Table 4. Characteristics of TiO_2

Parameter	Specification
TiO_2 content, wt. %	≥ 98
Color (in relation to the standard)	Не меньше
Coloring ability (in relation to the standard)	≥ 100
The content of volatile substances at 105 °C, % (wt./vol.)	≤ 0.5
Water solubility, %	≤ 0.5
PH level of the aqueous suspension	6.5~8.0
Oil capacity, % (wt./vol.)	≤ 26
Residue on the sieve (after 45 microns), % (wt./vol.)	≤ 0.15

mixture with TiO_2 of a previously determined mobility: a dry mixture of sand, white cement and additives was mixed with the necessary amount of tap water. The samples were stored for 2 days in molds at 95% humidity, then unmolded, stored for 5 days also at 95% humidity, and then for another 28 days at 60% humidity. The samples were tested for flexural and compressive strength on Controls 50-C8455 laboratory hydraulic press, Italy. The photocatalytic activity of the samples was determined by the degree of discoloration of the model organic pigment Methylene blue. Square plates of 5.0×5.0 cm and 1 cm thick were prepared and were tested using a method similar to the European standard UNI 11259-2016 [21], which consists in fixing the discoloration (mineralization) of an organic pigment applied to the surface of a material modified with a photocatalyst. The experiment was carried out as follows: an aqueous solution of Methylene blue with a concentration of 0.5% was applied to the surface of the sample plates and allowed to dry. The obtained samples were placed outdoors on the ground at an angle of 45 degrees to the surface facing south, the GPS coordinates are 55.389 degrees latitude and 36.8319 degrees longitude (Moscow region, Naro-Fominsk district) for 7 days (07.24.2024 – 07.31.2024). Weather conditions such as solar activity, clouds, and the ultraviolet index also play an important role in conducting the experiment, and the relevant data are shown in Table 5.

The ultraviolet index is an indicator adopted by the World Health Organization that characterizes the level of ultraviolet radiation in the spectrum of sunlight on the

Table 5. Weather conditions during the photocatalytic activity test period: July 2024 according to World Weather (https://world-weather.ru/pogoda/russia/naro_fominsk/july-2024 /)

Parameter	24.07	25.07	26.07	27.07	28.07	29.07	30.07	31.07
T, °C (day/night)	+25/+12	+22/+14	+24/+14	+26/+12	+24/+15	+19/+16	+19/+13	+18/+13
Clouds								
UV-index	6	4	5	5	5	4	4	3

Earth's surface, takes values from 0 to 11 and shows the degree of danger to humans. The value of the UV index in this study is important, since the processes of photocatalytic oxidation on the surface of TiO_2 particles are promoted by UV irradiation. In our study, the values of UV index vary from medium to high with average value of 4.5, which corresponds to the average ultraviolet activity.

The photos of the samples were taken at initial time, after 4 and 26 hours, then once a day. The photos were processed using ImageJ software, which was used to convert the RGB color parameters into the LAB color model, where L is the brightness of the object; a is the axis with hues from red to green; b is the axis with hues from yellow to blue. The photocatalytic activity of the samples was evaluated by changing parameter b and calculated using formulas (1)–(3):

$$R_4 = \frac{b_0 - b_4}{b_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$R_{26} = \frac{b_0 - b_{26}}{b_0} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R_{2day} = \frac{b_0 - b_{2day}}{b_0} \times 100\%, \quad (3)$$

where: b_0 is the value of the color coordinate at initial time; b_4 is the value after 4 hours of UV radiation; b_{26} is the value after 26 hours of UV radiation; b_{2day} is the value after 2 days of UV radiation. The R values should be more than 20% after 4 hours and more than 50% after 26 hours of UV exposure, according to the UNI 11259 standard, which determines whether a sample exhibits photocatalytic activity.

RESULTS AND DISCUSSION

In this work the authors studied the influence of industrial TiO_2 on the properties of cement-sand mortar and mechanical characteristics (compressive and flexural strength) of 40×40×160 mm prism samples made from a mixture of the required mobility at 2, 7 and 28 days age. The average W/C ratio was 0.70 which was used to prepare control and modified samples for further testing. Such a high value of W/C is due to the high dispersion of the dry building mix components. An increase in water consumption was observed with the introduction of TiO_2 additive in the amount of 1.7, 3.0, 5.0 and 10.0 wt.%. The volume of mixing water increased from 90.0 to 105.0 ml (by 6-24%), respectively: the sample with 10% TiO_2 additive showed the highest water consumption. For the control and 0.3 and 1.0% samples, the volume of water needed to achieve the required cone spreading was 85 ml. The strength parameters were evaluated on 40×40×160 mm prism samples. It follows from Fig. 2 that the maximum increase in compressive and flexural strength is observed for samples containing 5.0 wt.% of the additive: thus, compressive strength increased by 69% on the second day age, by 58% and 50% at 7 and 28 days age compared with the control sample. Flexural strength increased by 10, 13, and 50% at 2, 7, and 28 days age respectively. Introduction of 10.0 wt.% of the additive leads to a slight decrease in the strength of the modified samples at all periods of hardening. It is known that titanium oxide is a chemically resistant inert compound that has no hydraulic activity and does not interact with water. Thus, the presence of inert finely dispersed TiO_2 in such a high amount probably serves as an obstacle to the interaction of cement clinker minerals with water and the formation of hydration products.

Photocatalytic activity of the samples in relation to organic dye Methylene blue decomposition was studied at real-life conditions under natural solar radiation. The conventional determination of material's photooxidation ability is based on fluorescent xanthene red dye Rhodamine B discoloration. In this work, an organic derivative of thiazine Methylene blue was selected with a structure different from Rhodamine B and absorption in another part of the spectrum. which will expand the understanding of photooxidation of pigments of different structure and color when applied to the surface of a photocatalytic cement material.

As can be seen from Figures 5 and 6, compositions with a TiO_2 content starting from 3 wt.% are photocatalytically active with 10 wt.% sample having the highest

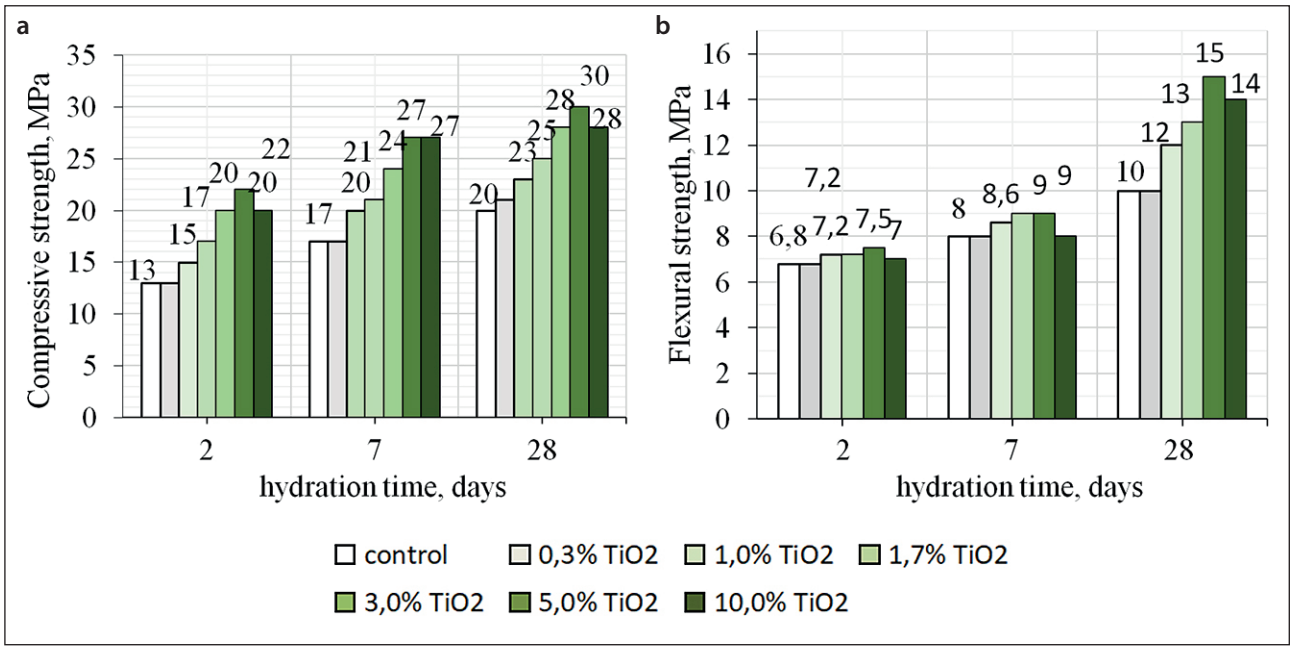


Fig. 3. Compressive (a) and flexural (b) strength of the samples

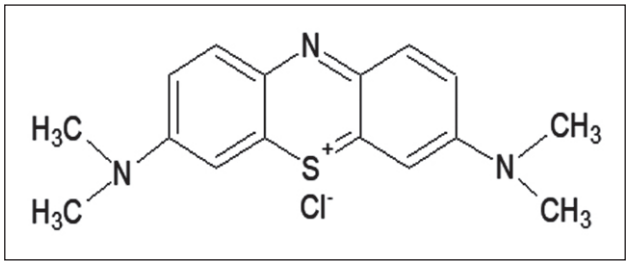


Fig. 4. The structural formula of Methylene blue

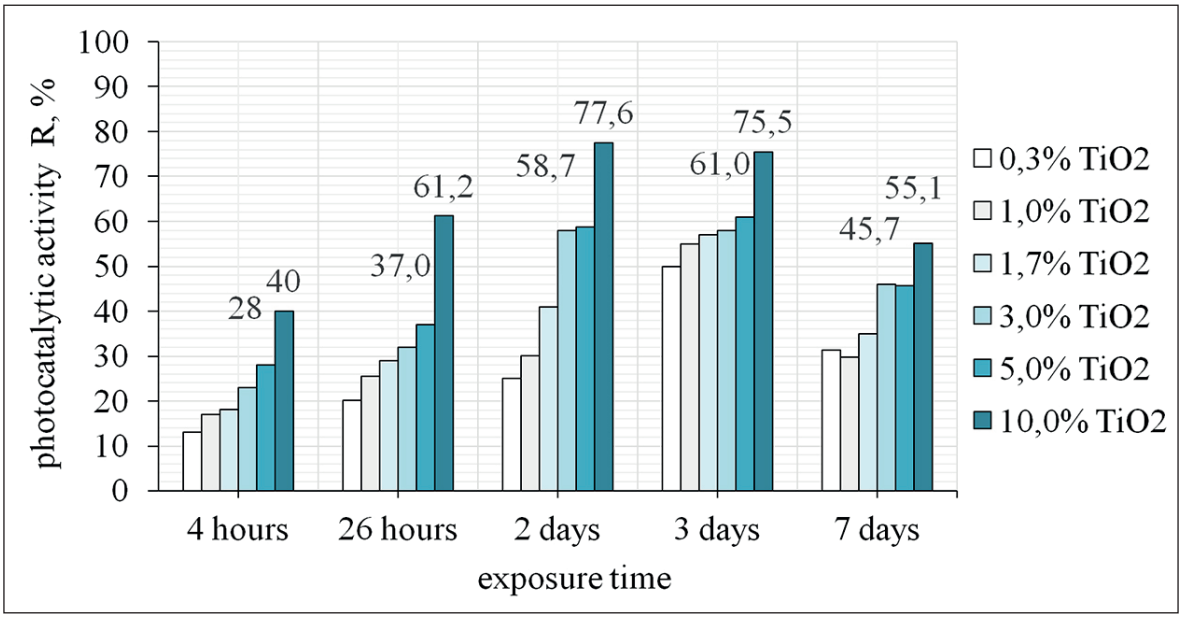


Fig. 5. Photocatalytic activity of cement-sand plaster samples with TiO_2 additive

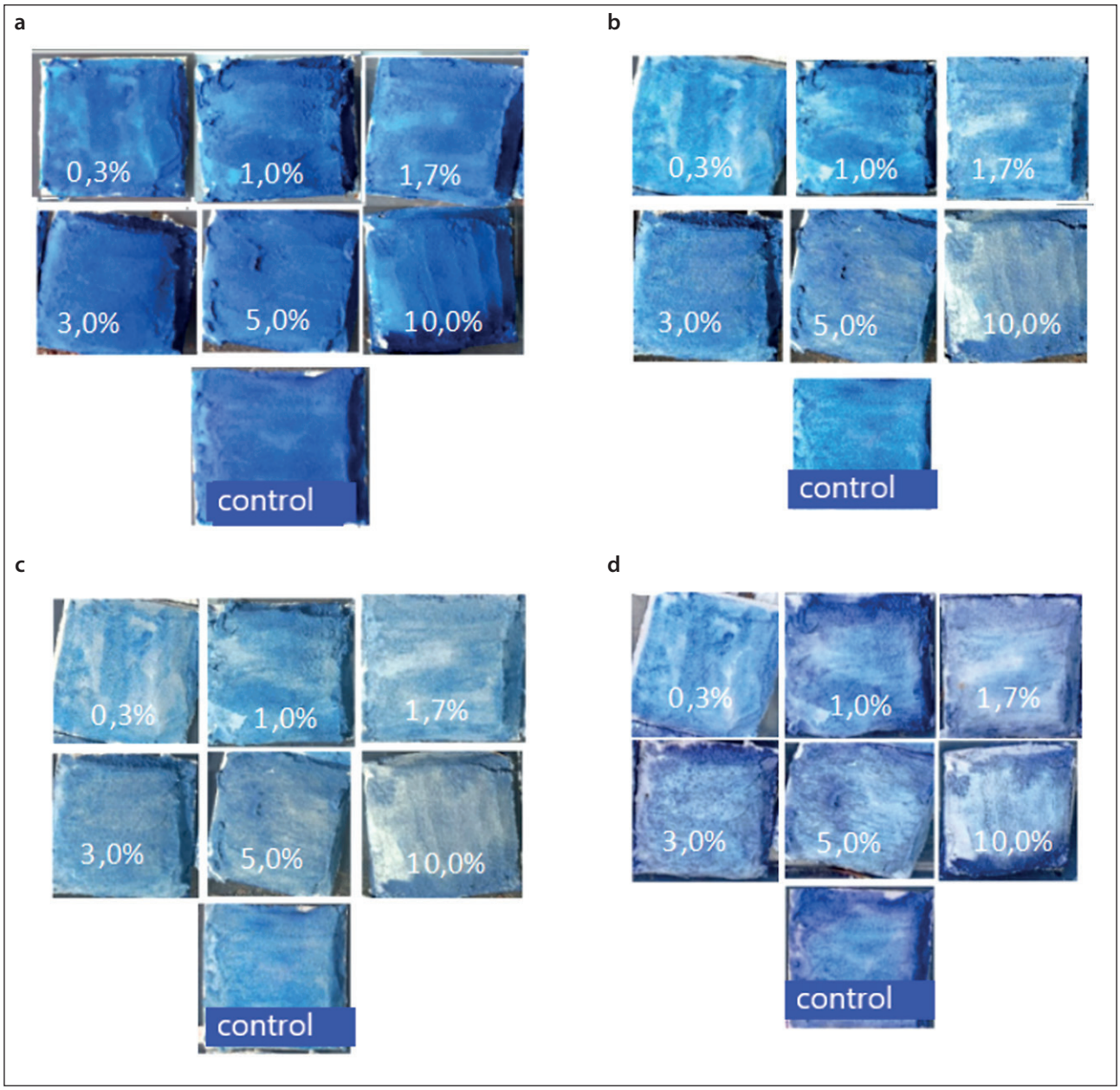


Fig. 6. Methylene blue discoloration after irradiation of the samples with natural sunlight: (a) at the initial moment; (b) after 26 hours; (c) after 3 days; (d) after 7 days

activity where R value is 40–78%. It is also noticeable that the maximum activity in relation to the dye mineralization is observed after 2 days of exposure of the samples to natural sunlight. At 7 days there is a significant decrease in the degree of pigment decomposition, which could serve several reasons: the first is the lighting mode. According to Table 2, it was on the 6th–7th day of the study that the weather conditions worsened – cloudy weather with rain, the UV-index values vary in the range of 3–4 points, which corresponds to a moderate level of UV activity compared to 5–6 points in the initial period of the study.

The second reason is the blocking of active photooxidation centers by decomposition products of pollutants and the adsorbtion of dust particles from the environment. The third is the carbonization process of the surface as a result of the reaction of carbon dioxide from the air with calcium hydroxide formed as a result of the hydrolysis and hydration reactions of cement clinker minerals, which also isolates the catalytic centers from sunlight. On the seventh day, the samples appear brighter, probably due to the moistening of the sample surface with rainwater. However, it is obvious that the degree of Methylene Blue discoloration is slowing down.

CONCLUSION

In this work, the authors investigated the physical, mechanical and photocatalytic characteristics of cement-sand plaster samples modified with industrial titanium dioxide of anatase modification. As a result of the study, the authors found that the greatest increase in compressive (by 69%, 58% and 50% on the 2nd, 7th and 28th days age) and flexural strength (by 10, 13 and 50% at the same age) corresponds to a sample with 5.0 wt.% of TiO_2 additives. Compositions with a TiO_2 content starting from 3 wt.% are photocatalytically active where maximum degree of Methylene blue decomposition corresponds to the samples with 5.0–10.0 wt.% of TiO_2 (58–78% at the 2nd and 3rd days of exposure). It was also revealed that by day 7, there is a significant decrease in the degree of pigment decomposition, which is probably due to the processes of blocking the active photooxidation centers by oxidation products, pollutants adsorbed from the environment, insufficient sunlight intensity caused by weather conditions, as well as carbonation processes. Thus, as a result of the conducted research, the authors concluded that the optimal amount of TiO_2 photocatalyst for introducing into the cement-sand composition is 5.0–10.0 wt.%, since these samples exhibit maximum strength characteristics combined with a high mineralization ability of the model contaminant.

REFERENCES

1. Inozemtcev S., Do T., Korolev E. Russian experience of research in the field of building materials with the function of self-healing. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhov.* 2022;7. https://doi.org./10.34031/2071-7318-2021-7-1-8-22

2. Mittal, T. Nano TiO_2-Based Smart Superhydrophilic Self-Cleaning Surfaces. Photocatalysts – New Prospectives. *IntechOpen*. 2022;1–10. https://doi.org./10.5772/intechopen.108157

3. Topçu İ., Uygunoğlu T. Self-Cleaning Concretes: An Overview. *Cement Based Composites*. 2020;(2):6–11.

4. S. Tian, Y. Feng, Z. Zheng, Z. He. TiO_2-Based Photocatalytic Coatings on Glass Substrates for Environmental Applications. *Coatings:* 2023;(13):1–28. https://doi.org./10.3390/coatings13081472

5. M. Russa, A. Macchia, S.A. Ruffolo [et al.]. Testing the antibacterial activity of doped TiO_2 for preventing biodeterioration of cultural heritage building materials. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2014;(96):87–96. https://doi.org./10.1016/j.ibiod.201410.002

6. Muhammad I., Mahak R., Ali H., Sadia N. [et al.]. A review of photocatalytic characterization, and environmental cleaning, of metal oxide nanostructured materials. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021;(30):1–42. https://doi.org./10.1016/j.susmat.2021.e00343

7. Krushelnitskaya E.A. Evaluation of photocatalytic activity of concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021;(4):13–20. https://doi.org./10.34031/2071-7318-2021-6-4-13-20

8. Strokova V.V., Ogurtsova, Y., Gubareva E., Nerovnaya S., Antonenko M. Multifunctional Anatase–Silica Photocatalytic Material for Cements and Concretes. *Journal of Composites Science*. 2024;(8). https://doi.org./10.3390/jcs8060207

9. Amor F., Baudys M., Racova Z., Scheinherrova, L., Ingrisova, L., Hájek, P. Contribution of TiO_2 and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16. https://doi.org./10.1016/j.cscm.2022.e00965

10. Irfan F., Tanveer M., Muhammad A., Husain S., Ramzan M. TiO_2 as an effective photocatalyst mechanisms, applications, and dopants: a review. *The European Physical Journal B*. 2022;95. https://doi.org./10.1140/epjb/s10051-022-00440-8

11. Díaz-Abad S., Rodrigo M., Saez C., Lobato J. Enhancement of the Green H_2 Production by Using TiO_2 Composite Polybenzimidazole Membranes. *Nanomaterials*. 2022;(12):2920. https://doi.org./10.3390/nano12172920

12. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*. 1972;(238):37–38. https://doi.org/10.1038/238037a0

13. Mohan S., Ravikumar M. P. Insights into the TiO_2-Based Photocatalytic Systems and Their Mechanisms. *Catalysts*. 2019;(9):680. https://doi.org/10.3390/catal9080680

14. Wang X., Teo S. H., Shamsuddin M., Wid N. Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and Microplastics Using Ag/TiO_2: Recent Advances in Mechanism, Synthesis and Properties. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2024;236. https://doi.org/10.1007/s11270-024-07669-2

15. Lebedev V.A. Metody povyshenija fotokataliticheskoj aktivnosti TiO_2 i nanokompozitov na ego osnove. *Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata himicheskih nauk*; 2017.

16. Das A., Patra M., Wary R., Gupta P., Nair R. Photocatalytic performance analysis of Degussa P25 under various laboratory conditions. IOP Conference Series: Materials *Science and Engineering*. 2018;377. https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012101

17. Musa M., Mohamad Juoi, J., Mohd Rosli, Z., Johari, N. Effect of Degussa P25 on the Morphology, Thickness and Crystallinity of Sol-Gel TiO_2 Coating. *Solid State Phenomena*. 2017;268:224-228. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.268.224

18. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Methodological Substantiation of the choice of a stabilizer for bismuth titanate fine particles suspensions. *Nanotechnologies in construction*. 2023;15(2):97-109. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-97-109

19. Antonenko M., Ogurtsova Y., Strokova V.V., Gubareva E. Photocatalytic active self-cleaning cement-based materials. Compositions, properties, application. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020;16-25. https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25

20. Choi Y. Degree of Hydration, Microstructure, and Mechanical Properties of Cement-Modified TiO_2 Nanoparticles. *Materials*. 2024;17. https://doi.org/10.3390/ma17184541

21. UNI EN 11259:2016: Determination of the photocatalytic activity of hydraulic binders – Rodammina Test Method (UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione). – Milano; 2016.

22. Khursheed S., Tehreem R., Awais M., Hussain D., Malik M., Mok Y., Siddiqui G. Visible-Light Driven Photodegradation of Industrial Pollutants Using Nitrogen-Tungsten Co-Doped Nanocrystalline TiO_2: Spectroscopic Analysis of Degradation Reaction Path. *Nanomaterials*. 2022;12. https://doi.org/10.3390/nano12132246

23. Razali M., Dris M.R.M., Rudin, N.N.S.M. Photodegradation of methyl orange dye using titanium dioxide photocatalyst. *Journal of Sustainability Science and Management*. 2009;4:49-55.

24. Dariani R., Esmaeili A., Mortezaali A., Dehghanpour S. Photocatalytic reaction and degradation of methylene blue on TiO_2 nano-sized particles. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. 2016;(127):7143-7154. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.04.026

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina O. Dudareva – Senior Lecturer of the Department of Construction Materials Science, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, modudareva@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6069-0256

Irina V. Kozlova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, iv.kozlova@mail.ru, https://orcid.org/000-0001-8269-5624

Olga V. Zemskova – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, ov.zemskova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9500-2492

Nikita S. Borisenkov – 4th year student, Laboratory Assistant at the Department of Construction Materials Science, National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, nbs20038 nbs20038@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-2356-5696

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

M.O. Dudareva – research concept; writing the initial text; conducting the experimental part.

I.V. Kozlova– scientific guidance; final conclusions.

O. V. Zemskova – scientific guidance; final conclusions.

N.S. Borisenkov – conducting the experimental part.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 23.02.2025; approved after reviewing 06.04.2025; accepted for publication 08.04.2025.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Научная статья / Original article
УДК 666.9
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-179-188

CC BY 4.0

Фотокаталитическая активность цементно-песчаной штукатурки под воздействием естественного солнечного излучения

Марина Олеговна Дударева*, Ирина Васильевна Козлова, Ольга Викторовна Земскова, Никита Сергеевич Борисенков

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: modudareva@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Бетон и разнообразные цементные композиты с уверенностью можно отнести к наиболее востребованным и универсальным строительным материалам. Не так давно широкое распространение получили фотокаталитически активные строительные материалы, содержащие в своей структуре частицы фотокатализаторов на основе нано- и тонкодисперсных частиц оксидов и солей некоторых металлов, в частности диоксида титана анатазной модификации. Под воздействием света поверхность таких материалов становится способной к самоочищению. Зачастую лабораторная оценка фотокаталитической активности материала сводится к облучению образцов искусственным источником света определенной длины волны, что недостаточно полно характеризует поведение материала при эксплуатации в реальных условиях окружающей среды. Поэтому целью данного исследования является оценка фотокаталитической активности образцов цементно-песчаной штукатурки в условиях облучения естественным солнечным светом в природных условиях. **Материалы и методы.** В рамках данной работы изучали свойства цементно-песчаной штукатурки, модифицированной добавкой промышленного диоксида титана анатазной модификации. Добавку вводили в штукатурные составы в количествах 0,3; 1,0; 1,7; 3,0; 5,0 и 10,0 масс.% в процессе сухого смешивания компонентов. На первом этапе исследовали влияние добавки на строительно-технические и физико-механические характеристики образцов. Вторая часть исследования посвящена изучению фотокаталитических свойств материала. Фотоокисление модельного загрязнителя Метиленового синего проводили в природных условиях под воздействием естественного солнечного излучения, фотокаталитическую активность образцов оценивали в соответствии с европейским стандартом UNI 11259-2016. **Результаты.** В результате проведенного исследования авторы установили, что наибольший прирост прочности при сжатии и изгибе соответствует образцу с 5,0% масс. добавки TiO_2, а максимальная степень разложения Метиленового синего характерна для образца с 10,0% масс. TiO_2. Так, прочность при сжатии возрастает на 69% во вторые сутки, на 58% в возрасте 7 суток и на 50% в марочном возрасте по сравнению с контрольным образцом. Прочность при изгибе увеличивается на 10; 13 и 50% во 2, 7 и 28 сутки, соответственно. Прочность образцов с большим количеством добавки остается примерно на уровне бездобавочного образца. Фотокаталитически активными являются составы с содержанием TiO_2 начиная с 3% масс., наибольшей активностью обладает 10%-ный образец, для которого значение R составляет 40–78%. Также заметно, что максимальная активность в отношении минерализации Метиленового синего (58–78%) наблюдается после 2 суток нахождения образцов в условиях естественного солнечного освещения, к 7 суткам наблюдается значительное снижение степени разложения пигмента. **Заключение.** В результате проведенных исследований авторы пришли к выводу, что оптимальным количеством фотокатализатора TiO_2 для введения в состав цементно-песчаной композиции является 5,0–10,0% по массе смеси, поскольку данные образцы проявляют максимальные прочностные характеристики в сочетании с высокой способностью к минерализации модельного загрязнителя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: штукатурка цементная, фотокаталитическая активность, промышленный оксид титана, анатаз, естественное солнечное освещение, обесцвечивание, метиленовый синий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Дударева М.О., Козлова И.В., Земскова О.В., Борисенков Н.С. Фотокаталитическая активность цементно-песчаной штукатурки под воздействием естественного солнечного излучения. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(2):179–188. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-179-188. – EDN: XBEDTX.

© Дударева М.О., Козлова И.В., Земскова О.В., Борисенков Н.С., 2025

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

The photocatalytic activity of cement-sand plaster under the influence of natural solar radiation

Marina O. Dudareva*, Irina V. Kozlova, Olga V. Zemskova, Nikita S. Borisenkov
National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia
* Corresponding author: e-mail: modudareva@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Concrete and cement composites can be considered as the most demanded and versatile building materials nowadays. Recently, photocatalytic building materials containing nano- and finely dispersed oxides and salts photocatalyst particles, especially titanium dioxide of anatase modification, are becoming widespread. Under the influence of light, the surface of these materials becomes capable of self-cleaning. The materials photocatalytic activity is usually determined in the laboratory conditions by irradiating samples with an artificial source of light with certain wavelength, which does not fully characterize the behavior of the material in real-life conditions. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the photocatalytic activity of cement-sand plaster samples under natural solar radiation. **Materials and methods of research.** In this study, the properties of cement-sand plaster modified with an additive of industrial TiO_2 were studied. The additive was introduced into the plaster compositions in amounts of 0.3; 1.0; 1.7; 3.0; 5.0 and 10.0 wt.% during the dry mixing of the components. At the first stage, the effect of the additive on physical and mechanical properties of the samples was investigated. The second part of the research is devoted to the study of the photocatalytic properties of the material. Mineralization of the model pollutant Methylene blue was carried out in real-life conditions under sunlight irradiation, the photocatalytic activity of the samples was evaluated in accordance with the European standard UNI 11259-2016. **Results and discussion.** As a result of the study, the authors found that the maximal increase in compressive and flexural strength corresponds to the sample with 5.0 wt.% of TiO_2, and the maximum degree of Methylene blue decomposition corresponds to the sample with 10.0 wt.% of TiO_2. Thus, compressive strength increases by 69% at 2 days age, by 58% at 7 days age, and by 50% at 28 days age compared to the control sample. Flexural strength increases by 10, 13, and 50% at 2, 7, and 28 days age, respectively. The strength of the samples with 10.0 wt.% of TiO_2 remains approximately at the level of the control sample. Compositions with TiO_2 starting from 3 wt.% demonstrate photocatalytic activity (R), the highest R corresponds to 10 wt.% sample with R value is 40–78%. It is also noticeable that the maximum Methylene blue mineralization (58–78%) is observed after 2 days of sunlight irradiation, after 7 days there is a significant decrease in the degree of pigment decomposition. **Conclusion.** As a result of the research, the authors concluded that the optimal amount of TiO_2 photocatalyst in the cement-sand plaster is 5.0–10.0 wt.% since these samples exhibit maximum strength characteristics combined with a high ability of model contaminant degradation.

KEYWORDS: cement plaster, photocatalytic activity, industrial titanium oxide, anatase, sunlight irradiation, mineralization, Methylene blue

FOR CITATION:
Dudareva M.O., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Borisenkov N.S. The photocatalytic activity of cement-sand plaster under the influence of natural solar radiation. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(2):179–188. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-179-188. – EDN: XBEDTX.

ВВЕДЕНИЕ

Растущие объемы строительства предполагают создание инновационных строительных материалов различного функционального назначения. Направления исследований в области строительного материаловедения включают внедрение нанотехнологий, разработку умных материалов, структур со способностью к самоочищению и самовосстановлению. Ключевая роль в современном мире отводится проблемам экологии и энергосбережения при производстве и эксплуатации строительных материалов, изделий и конструкций. Особое внимание уделяется экологическим аспектам, влияющим на создание комфортных условий в крупных городах и мегаполисах, которые более подвержены механическим, физическим и биологическим видам загрязнений [1–3].

Одним из вариантов решения существующих проблем можно считать введение в состав традиционных строительных материалов фотокатализаторов – соединений, на активной поверхности которых под воздействием солнечного излучения протекают фотокаталитические процессы окисления загрязнителей органического и неорганического происхождения, а также вирусов, спор микроскопических грибов, водорослей и лишайников. Фотокатализаторы могут применяться для модифицирования разных по структуре и происхождению строительных

материалов, в особенности стекла и цементных составов. Кроме того, частицы полупроводниковых оксидных фотокатализаторов придают поверхности материала повышенную гидрофильность, благодаря чему загрязнения и продукты их окисления будут легко смываться дождевой водой, дольше оставаясь чистыми [4–10].

Очевидно, что модифицирование традиционных строительных материалов путем введения в их структуру фотокаталитически активных соединений является одним из приоритетных задач современного строительного материаловедения. Об этом говорит возрастающее количество опубликованных научных статей, материалов конференций, диссертаций и патентов по теме исследования процесса фотокатализа в изданиях, включенных в базу российской научной электронной библиотеки elibrary (рис. 1).

Наиболее востребованным на сегодняшний день фотокатализатором является диоксид титана анатазной модификации. Порошкообразный TiO_2 широко использовался в качестве белого пигмента на протяжении веков, поскольку он недорог, химически стабилен, нетоксичен. Однако ученые и инженеры постоянно находят новые возможности применения диоксида титана: в 1980-х годах его начали использовать для фотокаталитического получения газообразного водорода, в конце 1990-х годов был открыт фотокатализ и обнаружена способность поликристаллических пленок диоксида титана к изменению краевого угла смачивания под воздействием ультрафиолетового излучения. На следующем этапе оксид титана стал применяться и в строительстве для создания материалов с эффектом самоочищения за счет фотокаталитического окисления адсорбированных на поверхности загрязняющих веществ (рис. 2) [11–12].

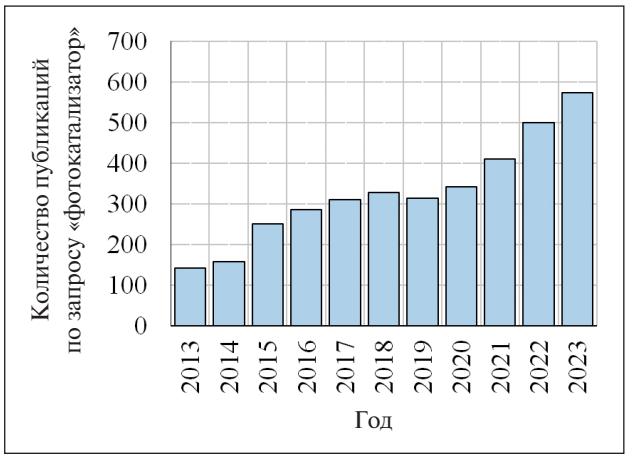


Рис. 1. Публикационная активность по запросу «фотокатализатор» в базе Российской научной электронной научной библиотеки elibrary

Механизм процесса фотокатализа для полупроводниковых фотокатализаторов, представителем которых является диоксид титана, достаточно подробно освещен в российской и зарубежной литературе [13–15]. Его принцип заключается в том, что при облучении светом частицы TiO_2 происходит активация электронов в валентной зоне, их перенос в зону проводимости с образованием электронно-дырочных пар. Электрон и электронная вакансия затем диффундируют к поверхности частицы TiO_2 и вступают в окислительно-восстановительные реакции с образованием активных форм кислорода (АФК), способных далее реагировать с адсорбированными загрязнителями различной природы, бактериями и вирусами, разлагая их до безвредных соединений. TiO_2 относится к широкозонным полупроводникам с шириной запрещенной зоны 3,2 эВ: это означает, что процесс формирования высокореакционных частиц осуществим только при энергии падающего излучения с длиной волны менее 400 нм, то есть в ультрафиолетовой части спектра.

Способность к самоочищению особенно актуальна при создании декоративных и отделочных строительных материалов. К наиболее востребованными можно отнести фасадные штукатурки на основе белого цемента, для которых важно долговременное сохранение белизны поверхности и стойкости к биообрастанию. В данном случае оптимальным решением будет введение в ее состав фотокатализатора.

Самым известным на сегодняшний день фотокатализатором является наноструктурированный TiO_2 Degussa P25, представляющий собой смесь двух модификаций (анатаз и рутил) 20–30% [16, 17]. Однако, в силу его высокой цены и труднодоступности на территории Российской Федерации, необходим поиск альтернативных вариантов фотокатализаторов. В качестве фотокаталитически активной добавки в данной работе авторы остановили свой выбор на промышленном оксиде титана TiO_2 ТА-100 в модификации анатаз производства KHP.

Промышленные фотокатализаторы, как правило, представляют собой высокодисперсные порошки, которые вводятся в состав сухих строительных смесей в процессе сухого смешивания компонентов или в виде суспензии вместо воды затворения, причем для достижения эффекта самоочищения поверхности необходимо вводить фотокатализатор в состав цементной композиции в среднем в количествах от одного до 10% по массе вяжущего, что не может не повлиять на физико-механические, строительно-технические и структурные свойства модифицированного цементного материала [18–20]. Таким образом, **одной из задач данного исследования** было изучение влияния добавки на основе коммерческого диоксида титана анатазной модификации на под-



Рис. 2. Области применения TiO_2

вижность и прочностные характеристики образцов цементно-песчаной штукатурки.

Также в рамках проведения настоящего исследования определяли фотокаталитическую активность образцов модифицированной цементно-песчаной штукатурки. К наиболее простым и наглядным способам оценки активности фотокатализатора и модифицированных материалов различного назначения относится европейский стандарт UNI 11259-2016 [21], основанный на фиксировании процесса обесцвечивания органического пигмента Родамина Б, нанесенного на поверхность исследуемых образцов, через 4 и 26 часов облучения от источника с определенной длиной волны, однако ряд работ свидетельствует о возможности использования других органических красителей, таких как, например, метиленовый синий, малахитовый зеленый, метиловый оранжевый и др. [22–24]. Образцы можно считать фотокаталитически активными, если степень разложения модельного загрязнителя после 4 часов облучения превышает 20%, а после 26 часов облучения составляет более 50%.

Зачастую исследования активности фотокатализаторов и модифицированных ими материалов проводятся в лабораторных условиях с применением источника излучения с фиксированной длиной волны в отсутствии таких факторов реальных эксплуатационных условий, как климатический пояс, суточные изменения температуры и освещенности, облачность, наличие или отсутствие осадков, географическое местоположение размещения образцов для проведения исследования. К тому же интенсивность ультрафиолетового излучения, конечно, зависит от местного климата, но обычно составляет около 5,5% от глобального солнечного излучения. Таким образом, поведение модифицированных фотокатализатором самоочищающихся штукатурных составов в реальных условиях эксплуатации может существенно отличаться от результатов, полученных при проведении эксперимента в лаборатории. Таким образом, **еще одним шагом в данном исследовании** было проведение натурных испытаний образцов модифицированной анатазом цементно-песчаной штукатурки для оценки ее фотокаталитической активности.

В целом, перед авторами статьи стояла задача определения оптимальной концентрации TiO_2 для введения в состав цементно-песчаной штукатурки, при которой наблюдались бы наилучшие прочностные показатели в сочетании с фотокаталитической активностью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе для получения образцов, модифицированных промышленным оксидом титана, использовали белый цемент марки Cemix PRO WHITE ПЦБ 1-500-Д0 ООО «Цемикс», химический и минералогический состав которого представлен в табл. 1, 2, а также белый кварцевый песок фракции 0,1–0,4 мм с характеристиками, представленными в табл. 3.

Таблица 1. Химический состав клинкера

Компоненты	Содержание оксидов, %							
	ППП	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	R_2O
Клинкер	1,0	21,0	5,5	0,5	65,0	1,0	3,3	0,1

Таблица 2. Минералогический состав клинкера

Клинкерные минералы	Содержание минералов, %			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Клинкер	66,0	8,5	13,5	1,5

Таблица 3. Характеристики песка

$\rho_{нас}$, г/см³	$\rho_{ист}$, г/см³	Средний размер зерна, мкм	Содержание оксидов, %							
			Глинистая составл.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	TiO_2
1,403	2,637	235,23	0,10	99,857	0,130	0,026	–	0,003	0,021	0,018

Таблица 4. Характеристики TiO_2

Параметр	Технические условия
Содержание TiO_2 в % (масс./об.)	≥ 98
Цвет (в соотношении со стандартом)	Не меньше
Красящая способность (в соотношении со стандартом)	≥ 100
Содержание летучих веществ при 105 °C, % (масс./об.)	≤ 0,5
Водорастворимость, %	≤ 0,5
Уровень pH водной суспензии	6,5~8,0
Маслоемкость, % (масс./об.)	≤ 26
Остаток на сите (через 45 мкм), % (масс./об.)	≤ 0,15

В качестве фотокаталитически активной добавки выбран промышленный оксид титана TiO_2 ТА-100 в модификации анатаз производства KHP, характеристика которого представлена в табл. 4.

Для начала необходимо было определить количество воды, необходимое для изготовления образцов для исследования прочностных и фотокаталитических показателей. Для этого определяли подвижность цементно-песчаного раствора с добавлением промышленного диоксида титана по ГОСТ 310.4: соотношение песок:цемент в контрольном и модифицированных образцах составляло 3:1, тонкодисперсный порошок фотокатализатора добавляли в количествах 0,3; 1,0; 1,7; 3,0; 5,0 и 10,0 масс.%, объем воды затворения соответствовал консистенции, характеризуемой расплывом конуса 106–115 мм.

Далее из цементно-песчаной смеси с добавкой TiO_2 заданной подвижности готовили образцы балочки 40×40×160 мм, для чего сухую смесь песка, белого цемента и добавки затворяли необходимым количеством водопроводной воды. Образцы хранили 2 суток в формах при 95% влажности воздуха, далее распалубливали, хранили в течение 5 суток также при влажности воздуха 95%, а затем еще 28 суток при влажности воздуха 60%. Образцы испытывались на прочность при изгибе и сжатии на лабораторном гидравлическом прессе Controls 50-C8455, Италия.

Фотокаталитическую активность модифицированных оксидом титана цементно-песчаных композиций определяли по степени деградации модельного загрязнителя органического пигмента метиленового синего, для чего готовили квадратные пластинки

5,0×5,0 см толщиной 1 см. Полученные образцы испытывали по методике, аналогичной европейскому стандарту UNI 11259-2016 [21], который заключается в фиксировании обесцвечивания (минерализации) органического пигмента, нанесенного на поверхность материала, модифицированного фотокатализатором.

Опыт проводили следующим образом: на поверхность образцов-пластинок наносили водный раствор Метиленового синего с концентрацией 0,5% и давали высохнуть. Полученные образцы были размещены на улице на земле под углом 45° к поверхности в южном направлении, GPS-координаты места проведения исследования составляют 55.389 градусов широты и 36.8319 градусов долготы (Московская область, Нарофоминский район) на протяжении 7 суток (24.07.2024 – 31.07.2024). Погодные условия, такие как солнечная активность, облачность и ультрафиолетовый индекс, также играют немаловажную роль в проведении эксперимента, соответствующие данные отражены в табл. 5.

Ультрафиолетовый индекс – это показатель, принятый Всемирной организацией здравоохранения, который характеризует уровень ультрафиолетового излучения в спектре солнечного света на поверхности Земли, принимает значения от 0 до 11 и отражает степень опасности для человека. Значение УФ-индекса в данном исследовании имеет значение, поскольку процессы фотокаталитического окисления на поверхности частиц оксида титана в модификации анатаз запускаются именно при облучении УФ-излучением. В нашем исследовании значения данного показателя варьируются от среднего до высокого, среднее значение УФ-индекса составляет 4,5, что соответствует средней ультрафиолетовой активности.

Фотографирование образцов осуществляли в начальный момент времени, через 4 и 26 часов, затем один раз в сутки в течение недели. Обработка фотографий проводилась при помощи программного обеспечения ImageJ, при помощи которого осуществляли конвертацию цветового параметра b пространства RGB в цветовую модель LAB, где L — яркость объекта; a — ось, по которой отложены градации от красного к зеленому; b — ось с градациями от желтого к синему. Фотокаталитическую активность образцов цементного камня оценивали по изменению параметра b и вычисляли формулам (1)–(3):

$$R_4 = \frac{b_0 - b_4}{b_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$R_{26} = \frac{b_0 - b_{26}}{b_0} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R_{2day} = \frac{b_0 - b_{2day}}{b_0} \times 100\%, \quad (3)$$

где b_0 – значение цветовой координаты в нулевой момент времени;

b_4 – значение цветовой координаты после 4 часов УФ излучения;

b_{26} – значение цветовой координаты после 26 часов УФ излучения

b_{2day} – значение цветовой координаты после 2 суток УФ излучения.

Значения R должны быть более 20 % спустя 4 часа и более 50 % спустя 26 часов воздействия УФ излучения, согласно стандарту UNI 11259, который определяет, проявляет ли образец фотокаталитическую активность.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках данной работы было исследовано влияние промышленного TiO_2 анатазной модификации на свойства цементно-песчаной растворной смеси и физико-механические характеристики (прочность при сжатии и изгибе) образцов-призм размерами 40×40×160 мм, изготовленных из растворной смеси требуемой подвижности, в возрасте 2, 7 и 28 суток.

В результате исследования подвижности растворных смесей было определено среднее водоцементное отношение, которое составило 0,70 и было использовано для изготовления контрольных и модифицированных образцов для дальнейших испытаний. Такое

Таблица 5. Погодные условия в период испытания фотокаталитической активности: июль 2024 года по данным World Weather (https://world-weather.ru/pogoda/russia/naro_fominsk/july-2024/)

Показатель	24.07	25.07	26.07	27.07	28.07	29.07	30.07	31.07
T, °C (день/ночь)	+25/+12	+22/+14	+24/+14	+26/+12	+24/+15	+19/+16	+19/+13	+18/+13
Облачность								
УФ-индекс	6	4	5	5	5	4	4	3

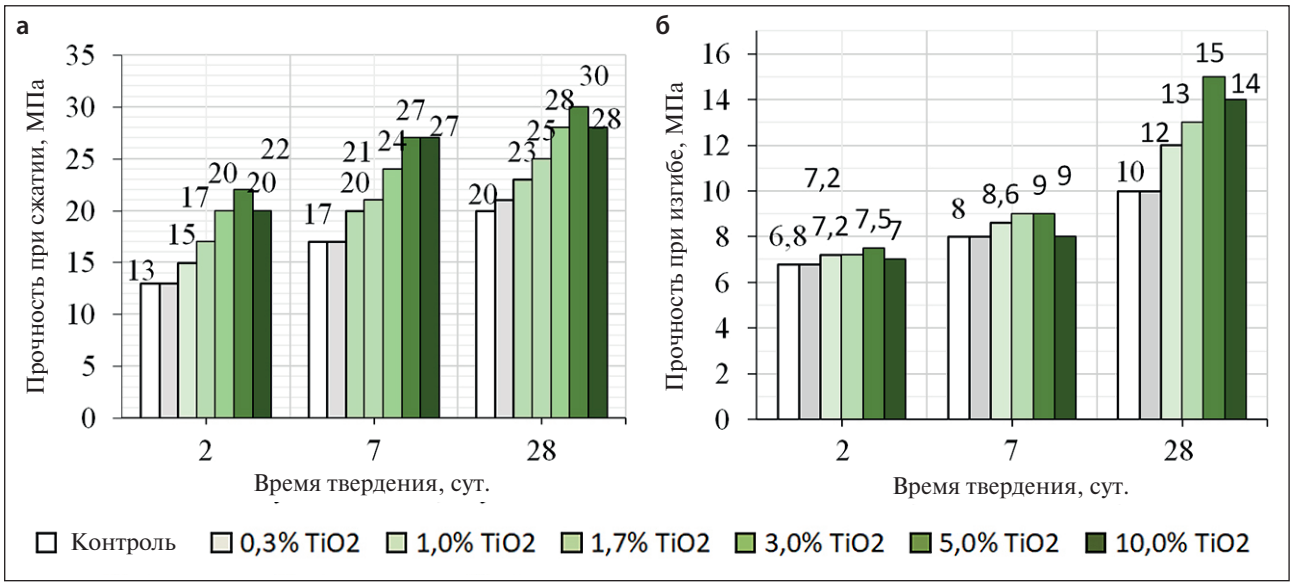


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии (а) и изгибе (б) от времени твердения образцов

большое значение В/Ц связано с высокой дисперсностью компонентов сухой строительной смеси. Было выявлено возрастание водопотребности при введении добавки TiO_2 в количестве 1,7; 3,0; 5,0 и 10,0% масс. Объем воды затворения увеличился с 90,0 до 105,0 мл (на 6–24%) соответственно: самая высокая водопотребность – у образца с 10% добавки TiO_2. Для контрольного и образцов с 0,3 и 1,0% добавки объем воды, необходимый для достижения требуемой подвижности цементного теста, составил 85 мл.

Прочностные показатели оценивали на образцах-балочках 40×40×160 мм. Из рис. 2 следует, что максимальный прирост прочности при сжатии и изгибе наблюдается для образцов с содержанием 5,0% добавки от массы вяжущего: так, прочность при сжатии возрастает на 69% во вторые сутки, на 58% в возрасте 7 суток и на 50% в марочном возрасте по сравнению с контрольным образцом. Прочность при изгибе увеличивается на 10; 13 и 50% во 2, 7 и 28 сутки соответственно. Введение большего количества (10,0% масс.) оксида титана приводит к незначительному спаду прочности модифицированных образцов во все сроки твердения. Известно, что оксид титана – химически стойкое инертное соединение, не обладающее гидравлической активностью и не взаимодействующее с водой. Таким образом, присутствие инертного тонкодисперсного TiO_2 в столь большой дозировке, вероятно, служит препятствием на пути взаимодействия минералов цементного клинкера с водой и формирования продуктов гидратации.

Исследование фотокаталитической активности образцов в отношении разложения органического красителя Метиленового синего проводили в условиях естественного солнечного облучения. При исследовании способности материала к фотоокислению наиболее часто используют раствор красного флуоресцентного красителя ксантенового ряда Родамина Б в качестве модельного загрязнителя. Для проведения данной работы был выбран органический пигмент, представляющий собой производное тиазина, Метиленового синего с отличной от Родамина Б структурой и поглощением в другой части спектра, что позволит расширить представления о фотоокислении разных по структуре и цвету пигментов при нанесении на поверхность фотокаталитически активного цементного материала.

Как видно из рис. 5 и 6, фотокаталитически активными являются составы с содержанием TiO_2 начиная с 3% масс., наибольшей активностью обладает 10%-ный образец, для которого значение R составляет 40–78%. Также заметно, что максимальная активность в отношении минерализации красителя наблюдается после 2 суток нахождения образцов в условиях естественного солнечного освещения, к 7 суткам наблюдается значительное снижение степени разложения пигмента, чему могло послужить несколько причин: первая из них – режим освещения. В соответствии с табл. 2, именно на 6–7 сутки

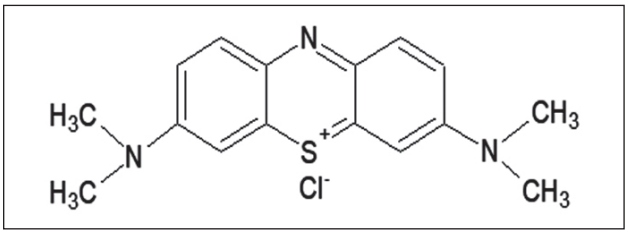


Рис. 4. Структурная формула Метиленового синего

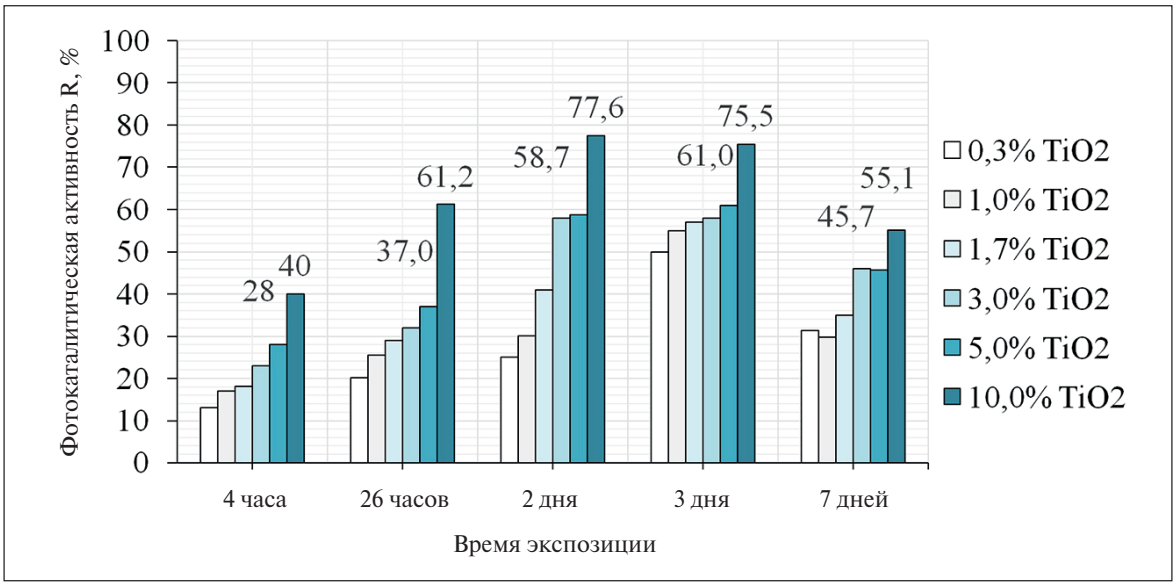


Рис. 5. Фотокаталитическая активность образцов цементно-песчаной штукатурки с добавкой TiO_2

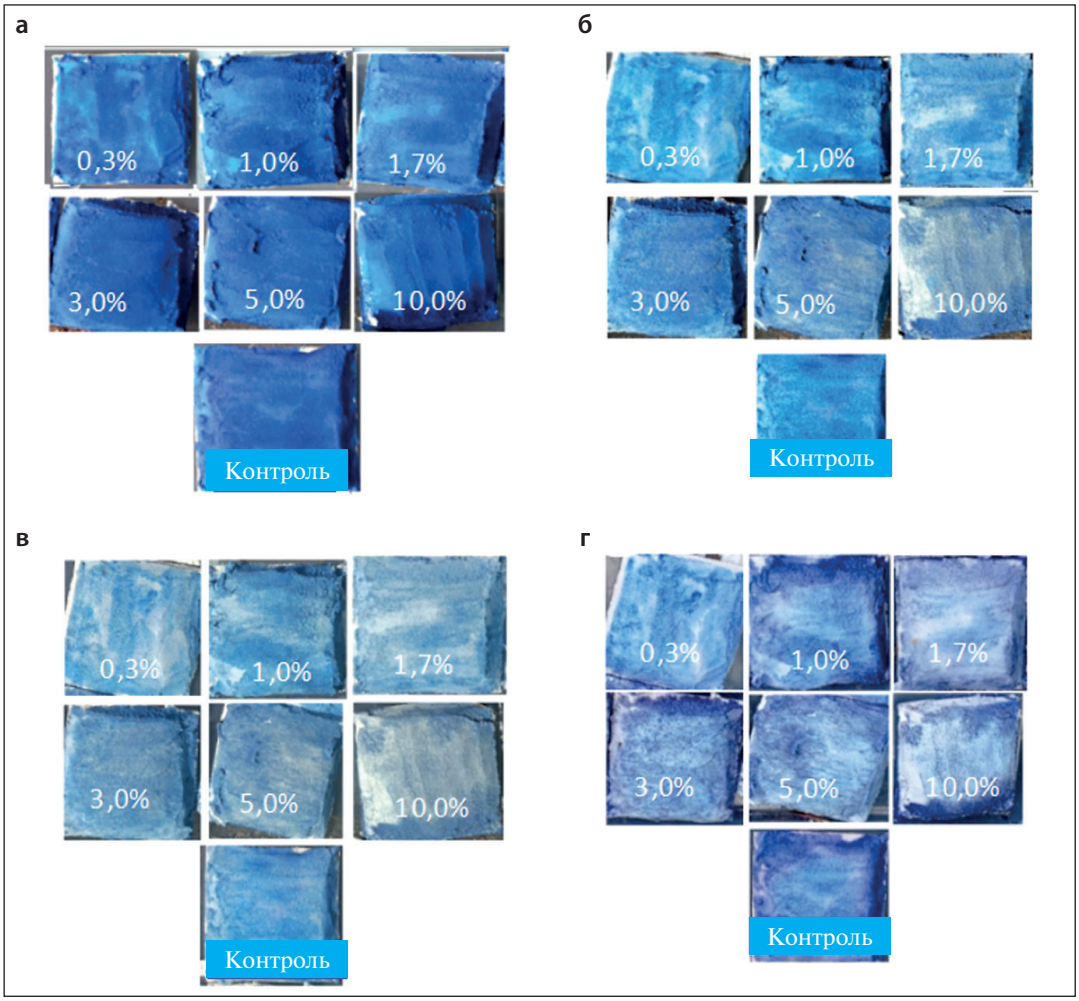


Рис. 6. Изменение окраски Метиленового синего после облучения образцов естественным солнечным светом: а – в начальный момент; б – через 26 часов; в – через 3 дня; г – через 7 дней

исследования наблюдалось ухудшение погодных условий – облачная погода с дождем, значения УФ индекса находились в пределах 3–4, что соответствует умеренному уровню УФ-активности против 5–6 в начальный период исследования.

Вторая причина – блокирование активных центров фотоокисления продуктами разложения загрязнителей и налипанием частиц пыли из окружающей среды. Третья - процесс карбонизации поверхности вследствие реакции взаимодействия углекислого газа воздуха с гидроксидом кальция, выделяющимся в результате реакций гидролиза и гидратации минералов цементного клинкера, из-за чего каталитические центры также оказываются изолированными от солнечного света. На седьмые сутки образцы кажутся ярче, видимо, из-за увлажнения поверхности образцов дождевой водой. Однако очевидно, что степень обесцвечивания Метиленового синего замедляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе авторы исследовали строительно-технические, физико-механические и фотокаталитические характеристики образцов цементно-песчаной штукатурки, модифицированной промышленным диоксидом титана анатазной модификации. В результате проведенного исследования авторы установили, что наибольший прирост прочности при сжатии (на 69%, 58% и 50% во 2, 7 и 28 сутки твердения) и изгибе (на 10, 13 и 50% в аналогичном возрасте) соответствует образцу с 5,0% масс. добавки TiO_2. Фотокаталитически активными являются составы с содержанием TiO_2 начиная с 3% масс., тогда как максимальная степень разложения Метиленового синего характерна для образцов с 5,0–10,0% масс. TiO_2 (58–78% на 2 и 3 сутки экспозиции). Также выявлено, что к 7 суткам наблюдается значительное снижение степени разложения пигмента, что, вероятно, обусловлено процессом блокирования активных центров фотоокисления продуктами окисления, загрязнителями, адсорбированными из окружающей среды, недостаточной интенсивностью солнечного света, вызванного неблагоприятными погодными условиями, а также процессами карбонизации.

Таким образом, в результате проведенных исследований авторы пришли к выводу, что оптимальным количеством фотокатализатора TiO_2 для введения в состав цементно-песчаной композиции является 5,0–10,0% по массе смеси, поскольку данные образцы проявляют максимальные прочностные характеристики в сочетании с высокой способностью к минерализации модельного загрязнителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Inozemtcev S., Do T., Korolev E. Russian experience of research in the field of building materials with the function of self-healing. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhov*. 2022;7. https://doi.org./10.34031/2071-7318-2021-7-1-8-22

2. Mittal, T. Nano TiO_2-Based Smart Superhydrophilic Self-Cleaning Surfaces. Photocatalysts – New Prospectives. *IntechOpen*. 2022;1–10. https://doi.org./10.5772/intechopen.108157

3. Topçu İ., Uygunoğlu T. Self-Cleaning Concretes: An Overview. *Cement Based Composites*. 2020;(2):6–11.

4. S. Tian, Y. Feng, Z. Zheng, Z. He. TiO_2-Based Photocatalytic Coatings on Glass Substrates for Environmental Applications. *Coatings:* 2023;(13):1–28. https://doi.org./10.3390/coatings13081472

5. M. Russa, A. Macchia, S.A. Ruffolo [et al.]. Testing the antibacterial activity of doped TiO_2 for preventing biodeterioration of cultural heritage building materials. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2014;(96):87–96. https://doi.org./10.1016/j.ibiod.201410.002

6. Muhammad I., Mahak R., Ali H., Sadia N. [et al.]. A review of photocatalytic characterization, and environmental cleaning, of metal oxide nanostructured materials. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021;(30):1–42. https://doi.org./10.1016/j.susmat.2021.e00343

7. Krushelnitskaya E.A. Evaluation of photocatalytic activity of concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021;(4):13–20. https://doi.org./10.34031/2071-7318-2021-6-4-13-20

8. Strokova V.V., Ogurtsova, Y., Gubareva E., Nerovnaya S., Antonenko M. Multifunctional Anatase–Silica Photocatalytic Material for Cements and Concretes. *Journal of Composites Science*. 2024;(8). https://doi.org./10.3390/jcs8060207

9. Amor F., Baudys M., Racova Z., Scheinherrova, L., Ingrisova, L., Hájek, P. Contribution of TiO_2 and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16. https://doi.org./10.1016/j.cscm.2022.e00965

10. Irfan F., Tanveer M., Muhammad A., Husain S., Ramzan M. TiO_2 as an effective photocatalyst mechanisms, applications, and dopants: a review. *The European Physical Journal B*. 2022;95. https://doi.org./10.1140/epjb/s10051-022-00440-8

11. Díaz-Abad S., Rodrigo M., Saez C., Lobato J. Enhancement of the Green H_2 Production by Using TiO_2 Composite Polybenzimidazole Membranes. *Nanomaterials*. 2022;(12):2920. https://doi.org./10.3390/nano12172920

12. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*. 1972;(238): 37–38. https://doi.org/10.1038/238037a0

13. Mohan S., Ravikumar M. P. Insights into the TiO_2-Based Photocatalytic Systems and Their Mechanisms. *Catalysts*. 2019;(9):680. https://doi.org/10.3390/catal9080680

14. Wang X., Teo S. H., Shamsuddin M., Wid N. Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and Microplastics Using Ag/TiO_2: Recent Advances in Mechanism, Synthesis and Properties. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2024;236. https://doi.org/10.1007/s11270-024-07669-2

15. Лебедев В.А. Методы повышения фотокаталитической активности TiO_2 и нанокомпозитов на его основе. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук*. 2017.

16. Das A., Patra M., Wary R., Gupta P., Nair R. Photocatalytic performance analysis of Degussa P25 under various laboratory conditions. IOP Conference Series: Materials *Science and Engineering*. 2018;377. https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012101

17. Musa M., Mohamad Juoi, J., Mohd Rosli, Z., Johari, N. Effect of Degussa P25 on the Morphology, Thickness and Crystallinity of Sol-Gel TiO_2 Coating. *Solid State Phenomena*. 2017;268:224-228. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.268.224

18. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Methodological Substantiation of the choice of a stabilizer for bismuth titanate fine particles suspensions. *Nanotechnologies in construction*. 2023;15(2):97-109. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-97-109

19. Antonenko M., Ogurtsova Y., Strokova V.V., Gubareva E. Photocatalytic active self-cleaning cement-based materials. Compositions, properties, application. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020;16-25. https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25

20. Choi Y. Degree of Hydration, Microstructure, and Mechanical Properties of Cement-Modified TiO_2 Nanoparticles. *Materials*. 2024;17. https://doi.org/10.3390/ma17184541

21. UNI EN 11259:2016: Determination of the photocatalytic activity of hydraulic binders – Rodammina Test Method (UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione). – Milano; 2016.

22. Khursheed S., Tehreem R., Awais M., Hussain D., Malik M., Mok Y., Siddiqui G. Visible-Light Driven Photodegradation of Industrial Pollutants Using Nitrogen-Tungsten Co-Doped Nanocrystalline TiO_2: Spectroscopic Analysis of Degradation Reaction Path. *Nanomaterials*. 2022;12. https://doi.org/10.3390/nano12132246

23. Razali M., Dris M.R.M., Rudin, N.N.S.M. Photodegradation of methyl orange dye using titanium dioxide photocatalyst. *Journal of Sustainability Science and Management*. 2009;4:49-55.

24. Dariani R., Esmaeili A., Mortezaali A., Dehghanpour S. Photocatalytic reaction and degradation of methylene blue on TiO_2 nano-sized particles. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. 2016;(127):7143-7154. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.04.026

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дударева Марина Олеговна – старший преподаватель кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, modudareva@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6069-0256

Козлова Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, iv.kozlova@mail.ru, https://orcid.org/000-0001-8269-5624

Земскова Ольга Викторовна – кандидат химических наук, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, ov.zemskova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9500-2492

Борисенков Никита Сергеевич – студент 4 курса, лаборант кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва, nbs20038@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-2356-5696

ВКЛАД АВТОРОВ

Дударева М.О. – концепция исследования; написание исходного текста; проведение экспериментальной части.

Козлова И.В. – научное руководство; итоговые выводы.

Земскова О. В. – научное руководство; итоговые выводы.

Борисенков Н.С. - проведение экспериментальной части.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 06.04.2025; принята к публикации 08.04.2025.

APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200

CC BY 4.0

Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene

Natalia I. Cherkashina, Vyacheslav I. Pavlenko, Sergey V. Serebryakov, Artyom Yu. Ruchiy*, Roman A. Barinov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

* Corresponding author: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The study aims to explore the possibility of creating microcapsules using a carbamide-formaldehyde shell (coat) that contains dicyclopentadiene. **Materials and methods.** The following reagents were used to synthesize carbamide-formaldehyde microcapsules: distilled water; carbamide (urea) with a purity of 99%; technical formalin; sodium hydroxide (Pro Analysis «PA»); neem seed oil (NSO); polysorbate Twin-80; dicyclopentadiene with a purity of 98%; absolute ethyl alcohol (dehydrated); hydrochloric acid (Pro Analysis «PA»). **Results and discussion.** Organic microcapsules were obtained by polymerization of carbamide-formaldehyde resin. Filling of microcapsules with dicyclopentadiene has been carried out by establishing equilibrium between concentrated solution of dicyclopentadiene in alcohol and capsule contents. Average size of capsules was ~100 μm. Capsules have spherical shape and solid shell. Fourier-transform IR (FTIR) spectrum confirmed required compositions of capsule shell and filler. Analysis of DSC curve (Differential scanning calorimetry curve) showed that filling of capsules with dicyclopentadiene was successful. **Conclusion.** The result of the research done is the successful synthesis of microcapsules using a carbamide-formaldehyde shell. This synthesis of microcapsules and its application in building materials technology opens up new prospects for creating composites with self-healing properties.

KEYWORDS: self-healing, self-restoration, formaldehyde, carbamide (urea), dicyclopentadiene, microcapsules, synthesis

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-79-10033 https://rscf.ru/project/24-79-10033/ using equipment based at the High Technology Center of BSTU named after V. G. Shukhov.

FOR CITATION:
Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Ruchiy A.Yu., Serebryakov S.V., Barinov R.A. Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene. *Nanotechnology in Construction.* 2025;17(2):189–200. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200. – EDN: XIVHFT.

Синтез самозалечивающихся микрокапсул на основе дициклопентадиена

Наталья Игоревна Черкашина, Вячеслав Иванович Павленко, Сергей Викторович Серебряков, Артём Юрьевич Ручий*, Роман Алексеевич Баринов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на изучение возможности синтеза микрокапсул на основе карбамидформальдегидной оболочки с содержанием дициклопентадиена. **Материалы и методы исследования.** Для синтеза карбамид-формальдегидных микрокапсул использовались следующие реактивы: вода дистиллированная; карбамид (мочевина) со степенью

© Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Ruchiy A.Yu., Serebryakov S.V., Barinov R.A. 2025

чистоты 99%; формалин «технический»; гидроксид натрия «ЧДА»; масло нима (NSO – neem seed oil); полисорбат Twin-80; дициклопентадиен со степенью чистоты – 98%; спирт этиловый абсолютированный; соляная кислота «ЧДА». **Результаты и обсуждение.** Органические микрокапсулы были получены путём полимеризации карбамид-формальдегидной смолы. Заполнение микрокапсул дициклопентадиеном осуществили посредством установления равновесия между концентрированным раствором дициклопентадиена в спирте и содержимым капсул. Средний размер капсул составил ~100 мкм. Капсулы имеют сферическую форму и сплошную оболочку. ИК-Фурье спектры подтвердили требуемые составы оболочки капсулы и наполнителя. Анализ кривой ДСК показал, что наполнение капсул дициклопентадиеном прошло успешно. **Заключение.** Результатом проделанной работы является успешный синтез микрокапсул на основе карбамидформальдегидной оболочки. Синтез микрокапсул и их внедрение в технологии строительных материалов открывают новые перспективы для создания композитов с эффектом самозалечивания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самозалечивание, самовосстановление, формальдегид, карбамид, дициклопентадиен, микрокапсулы, синтез

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10033 https://rscf.ru/project/24-79-10033/ с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Черкашина Н.И., Павленко В.И., Ручий А.Ю., Серебряков С.В., Баринов Р.А. Синтез самозалечивающихся микрокапсул на основе дициклопентадиена. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):189–200. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200. – EDN: XIVHFT.

INTRODUCTION

Modern research into materials of various compositions with a self-healing or self-restoring effect is a promising area of study in science [1–3]. These compositions are used not only in building materials [4–7], but also in bioengineering [8] and electronics [9–10], ensuring durability and resistance of structures made from them to mechanical damage.

Self-healing is the property of a material or system to partially or completely restore its original structure and functionality after physical and mechanical impacts (damage) [11–14]. Self-healing materials are able to restore their integrity [15–16] after damage due to the introduction of micro- and/or nanocapsules containing healing agents and catalysts into their structure, which react with subsequent hardening when a defect occurs [17–18]. The shell of the microcapsules can be made from both mineral [19] and polymer [20] materials and must have certain strength characteristics [21]. It must be strong enough not to be damaged during the manufacturing process of composite materials and while also being able to break down when various types of defects occur. Analysis of literature data has shown that the choice of components for the synthesis of microcapsules depends on the intended purpose and area of their future use [22, 23].

In the study [24], scientists described a method for creating self-healing porous concrete composites. This self-healing effect is achieved through the high-density structure of the material and the presence of an active mineral, iron sulfide, in the pores of the filler. When a defect forms in the finished product, the pores become damaged. Iron sulfide reacts with hydrated water in the filler to form ferrous ettringite, a hardening substance that closes the crack.

In the article [25], researchers examined the mechanisms of self-healing of polymer membranes used for water filtration. The scientists identified two types of self-healing: external and internal. External healing is dependent on microcapsules with a healing agent and a catalyst built into the membrane matrix, Internal healing is dependent on dynamic bonds between polymers that trigger autonomous healing through reversible chemical interactions (when bonds are broken, conformational changes occur and lead to contact between the ends of low-molecular reactive chains).

In the study [26], scientists investigated the physical properties of a self-healing composite based on epoxy resin with the addition of carbamide-formaldehyde microcapsules with a dicyclopentadiene monomer, multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and carbon fibers. They have found that this modification method significantly increases the tensile strength of the material without compromising the self-healing efficiency (90%) compared to unmodified samples (72%). The material also has shown promising values of a higher glass transition temperature (85 °C) in combination with improved curing efficiency (90%), which can be considered the novelty of this research.

The study [27] presents a method for creating self-healing polyurethane composite fibers with the addition of environmentally friendly cellulose nanocrystals (CNC) and investigates some physical properties of this material. Compared to polyurethane fibers without CNC additive, the elongation at break and tensile strength of the composite fibers have increased by 34% and 18%, respectively. After the cutting test, the self-healing poly-

urethane composite fibers with CNC showed no cracks on the surface, and their elongation at break and tensile strength increased by 57% and 128% respectively.

The aim of the study in the article [28] is to obtain composite hydrogels (PBLH) based on polyvinyl alcohol (PVA), borate (B), ε-poly-L-lysine (EPL) and hyaluronic acid (HA) with ultra-fast self-healing ability, elasticity and moldability by an efficient one-step method. The fabricated hydrogels exhibited outstanding characteristics of fast self-healing, stretchability and moldability. They could completely recover within one minute and take various shapes as specified.

Thus, the self-healing effect can be achieved in both mineral and organic building materials. This helps to extend the service life of production elements, reduce the costs of their maintenance and repair, and improve the safety of the structure or product as a whole. The aim of this research is to synthesize self-healing microcapsules based on a carbamide-formaldehyde shell with dicyclopentadiene. This article describes the process of producing microcapsules, analyzes their granulometric composition, and investigates the microstructure of the synthesized product. Additionally, the results of differential scanning calorimetry (DSC) curves of microcapsules without filler and with dicyclopentadiene filling has been carried out.

MATERIALS, EQUIPMENT, RESEARCH METHODS

Materials

To obtain carbamide-formaldehyde microcapsules, we used the following reagents in our study: distilled water in accordance with GOST 58144-2018; carbamide (urea) with a purity of 99% produced by Macklin Inc., China; technical formalin in accordance with GOST 1625-89 produced by LenReaktiv JSC, Russia, St. Petersburg; sodium hydroxide "ChDA" produced by Kaustik JSC, Russia, Volgograd; neem oil (NSO – Neem Seed Oil) produced by Shree Baidyanath Ayurved Bhawan Pvt., Ltd., India; Twin-80 polysorbate produced by Jaikisan Agrotech India Pvt., Ltd., India; dicyclopentadiene with a purity of 98% produced by Shanghai Acmec Biochemical Technology Co., Ltd.; absolute ethyl alcohol produced by RFK JSC, Russia, Moscow; hydrochloric acid "ChDA" produced by JSC "Caustic", Russia, Volgograd.

Equipment and research methods

The mass of the initial components and synthesized products was measured using laboratory scales from BK-600, manufactured by JSC MASSA-K, Russia, with a reading resolution of 0.01 grams.

To carry out the synthesis, we used a magnetic stirrer with heating and precise temperature setting 5Drops-HSS-2 "HS5S full set" manufactured by "Joanlab Equipment Co., Ltd.", China. The maximum heating temperature is 260 °C.

The mixing of the synthesized components was carried out using a laboratory overhead stirrer "EUROSTAR 20 high speed digital" manufactured by "NV-Lab", Russia. This device has a rotation frequency range from 0 to 150 rpm, as well as 6000 rpm.

To obtain deionized water, we used a DV-1M water deionizer manufactured by TsvetKhrom LLC, Russia, with a specific conductivity at 25 °C of less than 0.1 μS/cm and a capacity of up to 10 l/h.

Granulometric analysis of the obtained microcapsules was carried out on a laser diffraction analyzer Analysette 22 NanoTec plus manufactured by Fritsch, Germany, with a particle size measurement range of 0.01–2000 μm. The microstructure of the obtained products was analyzed using a Jenaval optical microscope with CarlZeiss JenaGF Planachromat 3.2x/0.06 ∞/-A and CarlZeiss JenaGF Planachromat 12.5x/0.25 ∞/-A objectives manufactured by Carl Zeiss Jena, Germany.

Fourier-transform IR (FTIR) spectra absorption spectrum of the obtained microcapsules was measured using a Sintecon IR10 infrared spectrometer in the range of wave oscillations of 5000 – 500 cm^{-1} with a spectral resolution of $\leqslant 2$ cm^{-1}.

Differential scanning calorimetry was performed using a synchronous thermal analysis device STA 449 F1 Jupiter manufactured by Netzsch, Germany. The temperature range for analysis was 20–350 °C, with a heating rate of 10 degrees per minute. The test environment was similar to air: 21% O_2, 79% Ar.

RESULTS AND DISCUSSION

Description of the technology for creating carbamide-formaldehyde capsules

Formalin weighing 11.1 g with a formaldehyde concentration of ~30%, alkalized to a 10% NaOH solution was mixed with 2.0 g urea and diluted to 200 ml with deionized water preheated to 60 °C. The solution was stirred with an overhead stirrer at 2000 rpm for 2 hours until the solution became slightly cloudy. Then 1 g of neem oil mixture with Twin-80 polysorbate (concentration of the latter is 0.1%) was added to the solution. The temperature in the system increased from 60 to 70 °C. After stirring for 1 hour, the pH of the solution was reduced by 20% hydrochloric acid from 11–10 to 3–4, and the color of the solution changed from yellow to white. Stirring was continued until noticeable polymer particles were formed and the volume of the solution decreased significantly.

The process of carbamide dissolving in formaldehyde is endothermic. The reaction conditions do not affect the production of primary reaction products, which are carbideoxymethylene (methylol) compounds. Carbonic acid

diamide (Fig. 1) is theoretically capable of adding 4 formaldehyde molecules, forming tetramethylol urea (Fig. 2).

The reaction rate constants ratio for the production of mono-, di- and trimethylolcarbinol is 9:3:1. The content of tetramethylolcarbamide is ultimately within the error limits and therefore was not taken into account. The mass ratio of carbamide to formaldehyde of 1:2 ensures the optimal equilibrium of the system for the formation of the largest amount of trimethylolcarbamide in the solution. It was also found that with an increase in the content of formaldehyde in the solution, approximately 2.8 moles of formaldehyde will still react per 1 mole of carbamide.

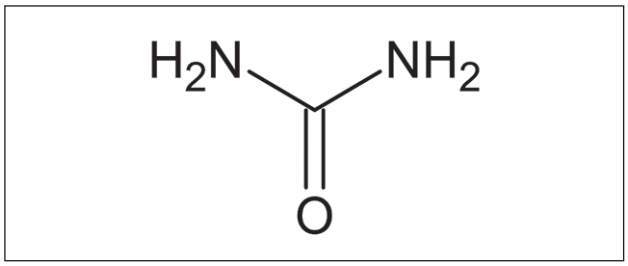


Fig. 1. Structural formula of carbonic acid diamide (urea, carbamide)

Mono- and dimethylolcarbamide have been of the greatest practical importance due to their ability to form polymers of a linear structure. The polymerization reactions of mono- and dimethylolcarbamide are presented below (Fig. 3).

During the curing process of the resin, this reaction also occurred between the free methylol groups. This reaction of polymerization can occur in parallel with the interaction between the ketone and hydroxyl groups (Fig. 3c).

Polymerization of trimethylolcarbamide (Fig. 4) can occur through both hydroxyl and ketone groups. Regardless of which functional groups are involved in the polymerization process, branched polymers are formed during the reaction.

The presence of such branched compounds has had a positive effect on the strength characteristics of the final microcapsules due to the linking of linear structures with each other.

In solution, these reactions occurred when heated in the acidic medium. Typically, carbamide-formaldehyde polymer clusters do not exceed a molecular weight of 700 amu. Due to the presence of methylol groups, the resulting compounds have a high solubility in water. To

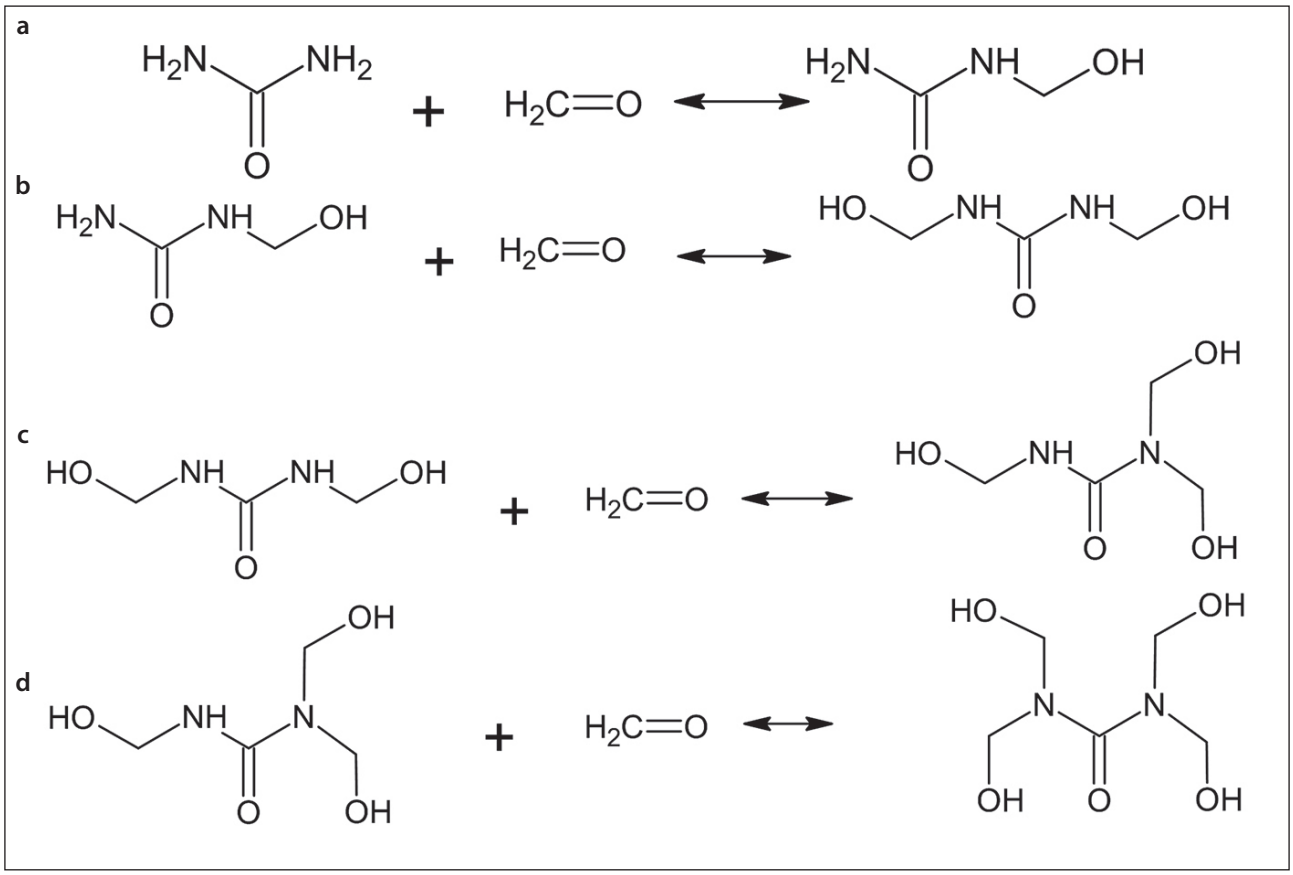


Fig. 2. Reactions for the obtaining of a) monomethylolcarbamide; b) dimethylolcarbamide; c) trimethylolcarbamide; d) tetramethylolcarbamide from carbamide and formaldehyde.

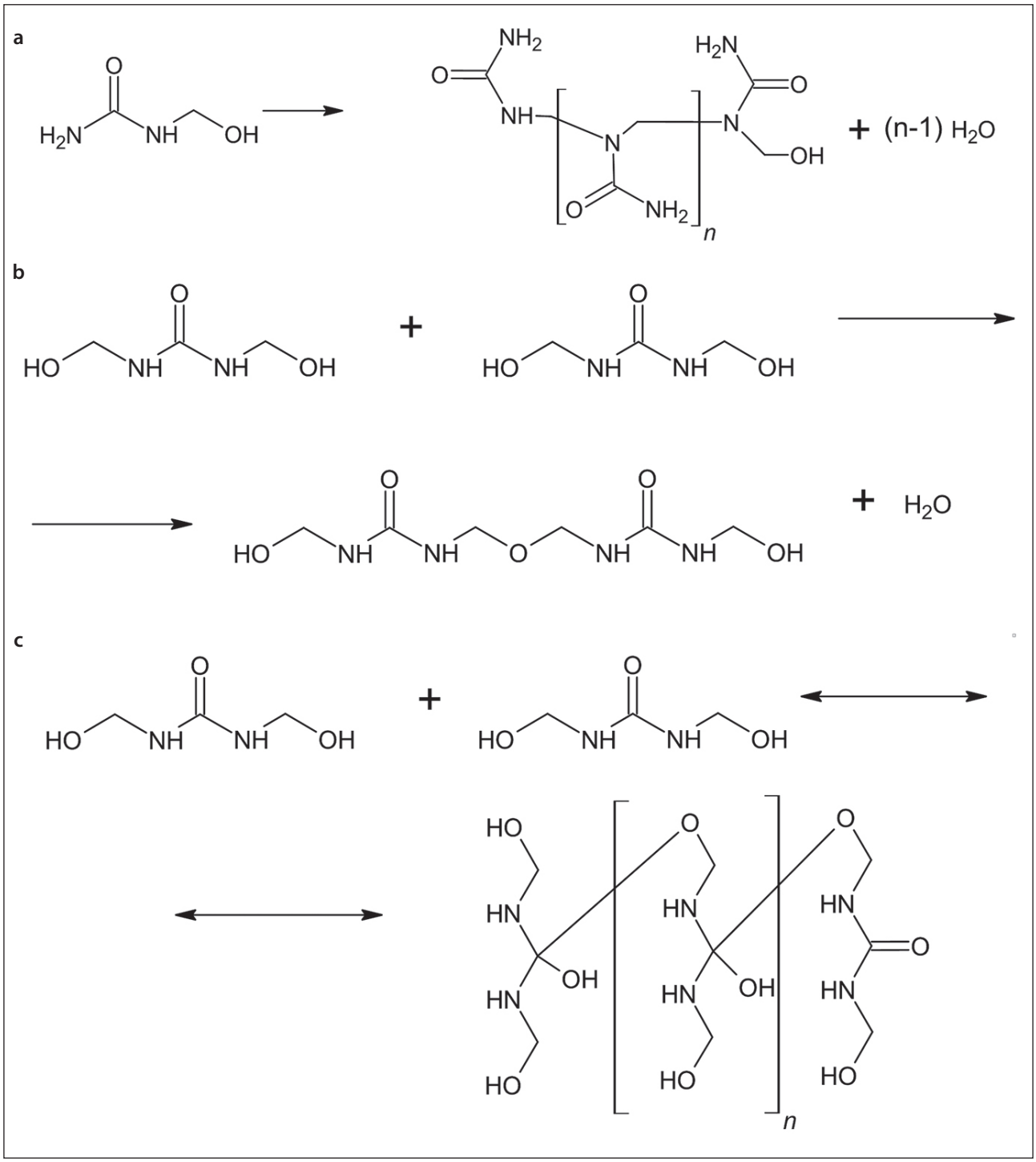


Fig. 3. Polymerization reactions of a) monomethylolcarbamide; b) dimethylolcarbomide; c) dimethylolcarbomide through the interaction of ketone and hydroxyl groups

give them the form of microcapsules, it is necessary to introduce substances with functional groups that can interact with primary amines and form stable polymerization centers. For these purposes, Neem Seed Oil (NSO), which contains nimbin, was introduced into the mixture. Due to its complex spatial structure, it is able to interact with methylolcarbamide through a ketone group, adding a primary amine (Fig. 5).

The size of the microcapsules was controlled by the speed of the overhead mixer and stabilized by Twin-80 polysorbate. The final curing of the carbamide-formaldehyde resins was carried out in the acidic medium at

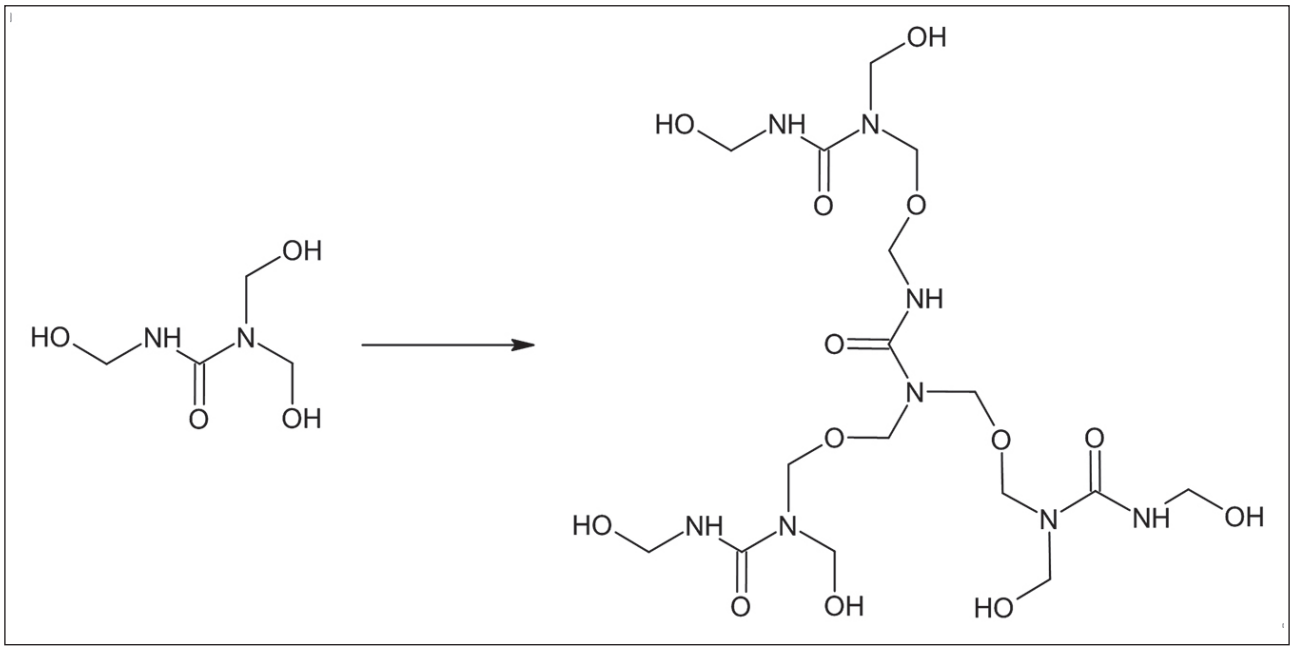


Fig. 4. Polymerization reaction of trimethylolcarbamide

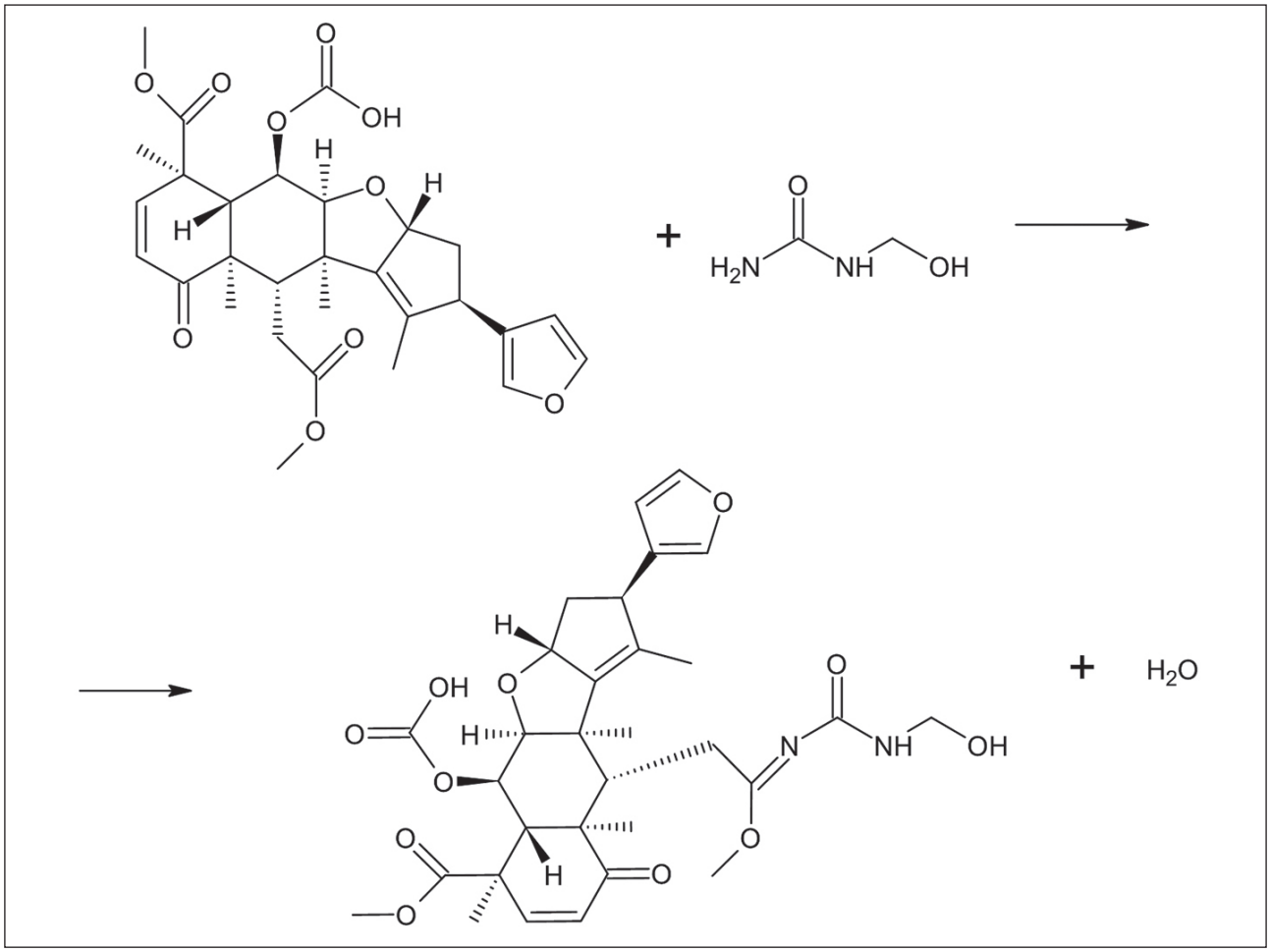


Fig. 5. Reaction of interaction of nimbin with methylolcarbamide

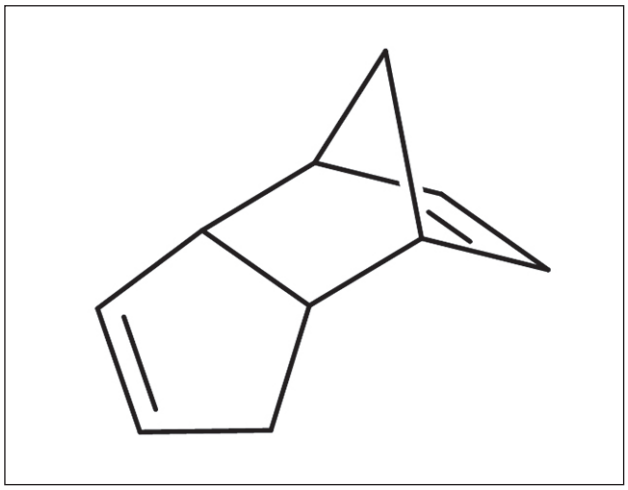


Fig. 6. Structural formula of dicyclopentadiene

pH values of 3–4. The weight of the resulting capsules was 20.4 g.

The next step was nimbin extraction. Extraction was performed in a Soxhlet apparatus with a 64% aqueous solution of ethyl alcohol as a solvent. During the extraction, oil was released from the microcapsules, causing the alcohol to turn white. The capsules were then washed on a polymer sieve (hole size 106 μm) using alcohol and deionized water. A 1.17-fold decrease in the capsule mass was recorded, amounting to 18.6 g. Such an insignificant change in mass is due to the replacement of the capsule contents with a solvent.

The filling of the capsules with functional contents took place in a boiling, saturated (50%) solution of dicyclopentadiene in ethyl alcohol for 6 hours. Dicyclopentadiene has the following structural formula (see Fig. 6).

Granulometric analysis

The result of granulometric analysis of the obtained microcapsules is presented in Fig. 7. Based on the obtained data, the graph shows that the size distribution of the produced carbamide-formaldehyde microcapsules can be described by a trimodal system with the first mode at 0.81 μm, the second mode at 8.80 μm, and the third mode at 105.97 μm. The predominant fraction of microcapsules has the size of ~100 μm. The specific surface area of the microcapsules is 8210 cm^2/cm^3.

Microscopic analysis

The morphology of the obtained microcapsules was studied by optical microscopy in transmitted light. The result is presented in Fig. 8. No deformation of the microcapsules during the experiments was observed. The spherical particles of the synthesized product with a continuous shell can be clearly seen in Fig 8. It is also worth

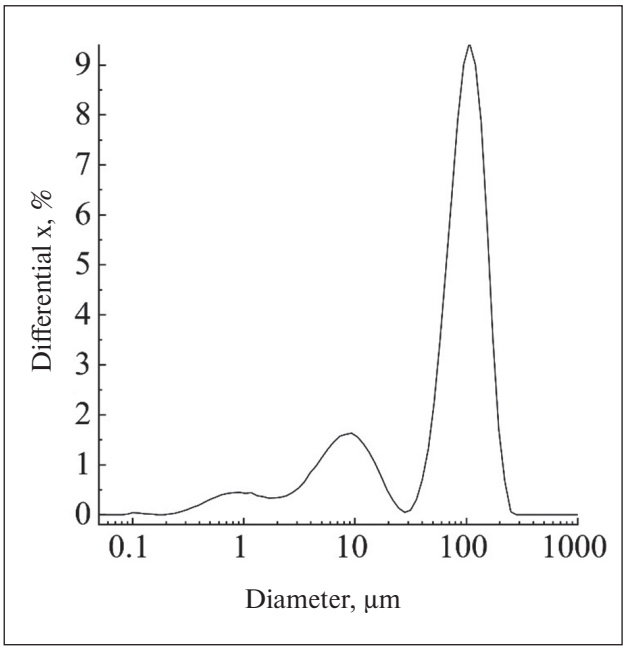


Fig. 7. Granulometric analysis of carbamide-formaldehyde microcapsules

noting that the average size of the microcapsules is consistent with the granulometric analysis (100 μm).

Fourier Transform Infra-Red spectrum study

The FTIR spectrum of the carbamide-formaldehyde film (Fig. 9) indicates a high content of amine groups in the polymer structure. A strong peak in the region of 1694 cm^{-1} indicates NH_2 stretching vibrations, which indicates the presence of predominantly monomethylolcarbamide in the polymer system.

The spectrum also shows a peak at 1586 cm^{-1} (longitudinal deformation of the amide bond), this peak is not typically used to analyze organic substances, but in this case, it indirectly indicates resin polymerization. The height of the peak depends on the concentration and in comparison, with the peak in the region of 746 cm^{-1} (spiral deformation of the amide bond), which also depends on the concentration, we can judge the presence of carbon frameworks at the ends of the amine bonds that make up the polymer chain. The peaks in the region of 799 and 1240 cm^{-1} can confidently state the bond of oxygen with carbon, which forms a ketone group.

The FTIR spectrum of dicyclopentadiene (Fig. 10) has shown peaks in the region of ~1250-600 cm^{-1}, which are characteristic of cyclic compounds. The presence of peaks at 1338 and 1253 cm^{-1}, provided that the ratio of their intensities is 2:1, indicates the presence of the $C–(C)_3$ bond, which is characteristic of dicyclopentadiene. The high-intensity peak at 764 cm^{-1} indicates out-of-plane 1,2-substituted bonds in the cycle.

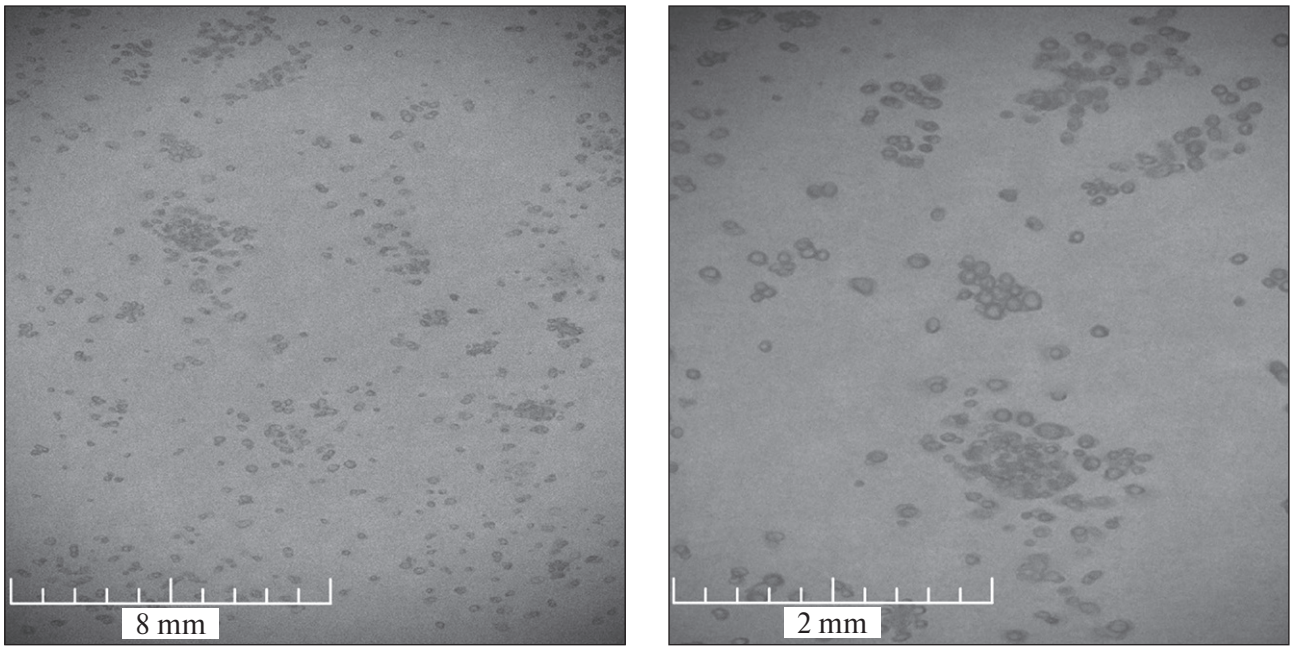


Fig. 8. Microscopic images of carbamide-formaldehyde microcapsules

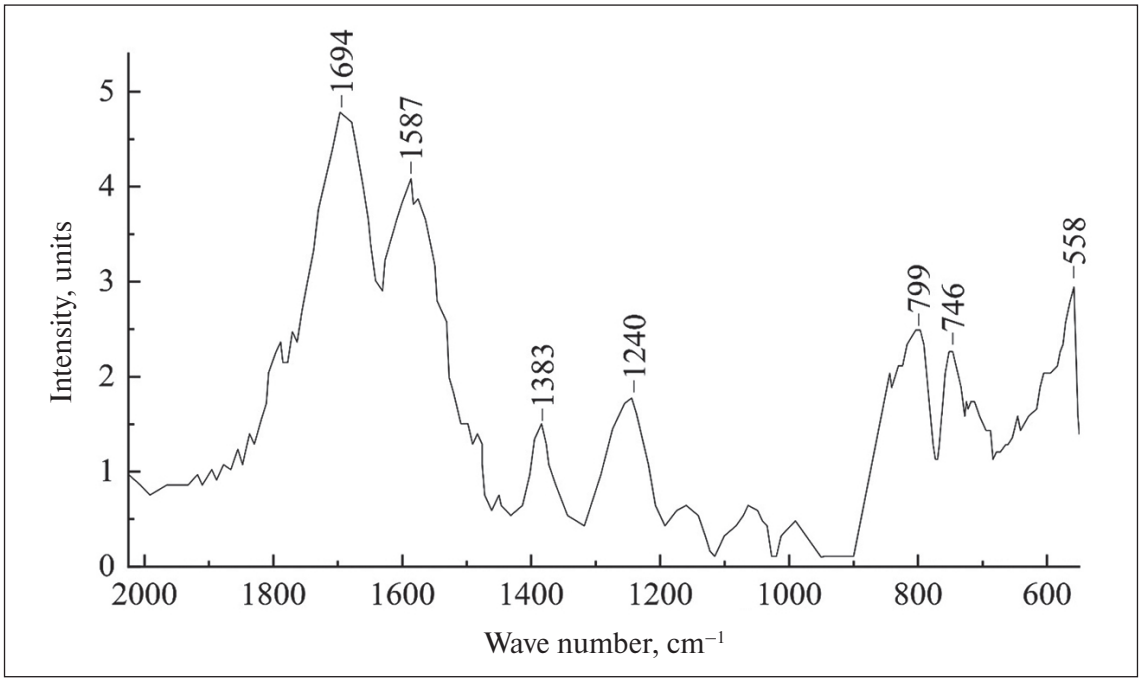


Fig. 9. FTIR spectrum of carbamide-formaldehyde film

Differential scanning calorimetry analysis

The DSC curve of carbamide-formaldehyde capsules (Fig. 11) shows three endothermic peaks at 107.5 °C; 257.1 °C; 295.9 °C and one exothermic peak at 278.9 °C. The peak at 107.5 °C indicates a phase transition with a slight vitrification of the structure. The subsequent peak at 257.1 °C indicates the complete melting of the peptide with a sharp oxidation at 278.9 °C and degradation with the release of volatile substances at 295.9 °C.

The DSC curve of microcapsules filled with DCPD is shown in Fig. 12 a. The decrease in the heat flow of the endothermic peak at 106.5–107.5 °C is associated with an increase in the evaporation rate of DCPD, which is accompanied by a loss of mass. The decrease in peaks in the range of 251.3–278.9 °C is associated with significant mass

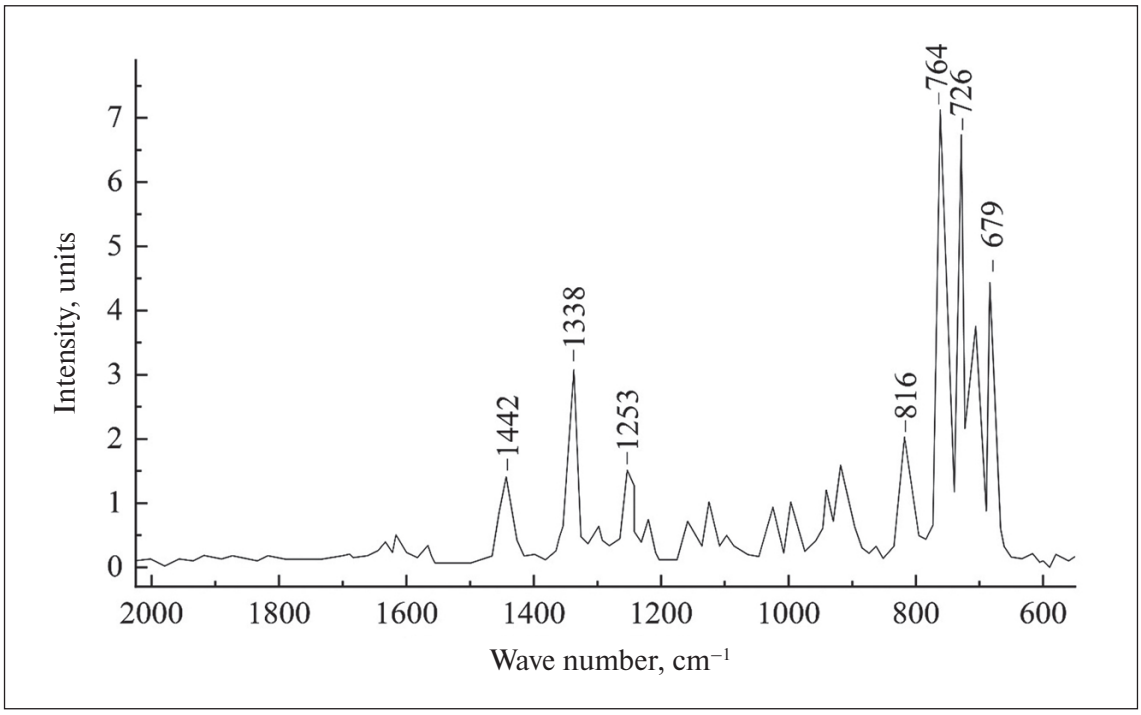


Fig. 10. FTIR spectrum of dicyclopentadiene

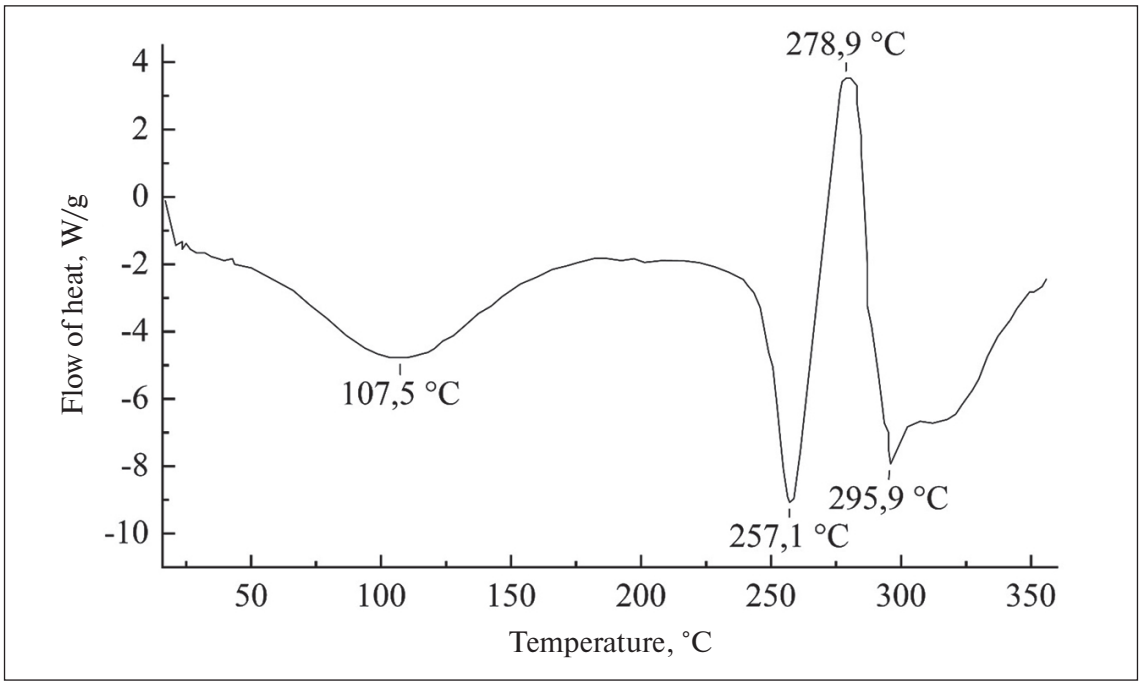


Fig. 11. DSC curve of carbamide-formaldehyde microcapsules

loss due to the complete combustion of DCPD during the melting of carbamide-formaldehyde resin.

When comparing the two DSC curves (Fig. 12 b), a small difference is visible with the general similarity of the graphs, which indicates successful filling of the capsules with dicyclopentadiene.

CONCLUSION

The result of the experiment performed is the successful synthesis of microcapsules with carbamide-formaldehyde shell, which is confirmed by FTIR spectroscopy. Microscopic analysis of the obtained product has shown

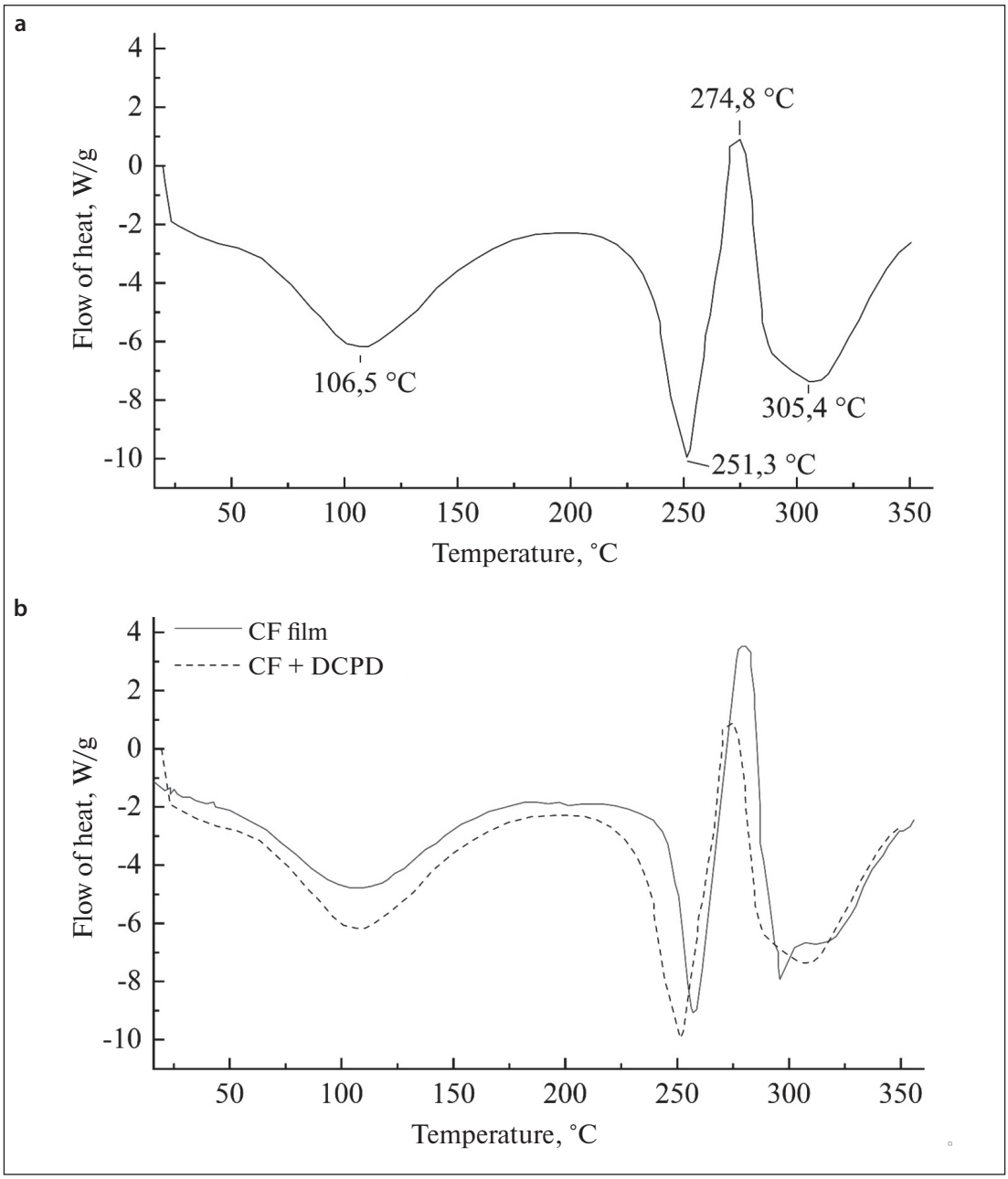


Fig. 12. DSC curves: a) carbamide-formaldehyde capsules with dicyclopentadiene; b) comparison of carbamide-formaldehyde capsules without filler (CF film) and carbamide-formaldehyde capsules containing dicyclopentadiene (CF + DCPD)

the absence of damage, and that the microcapsules have a solid spherical shell. Analysis of the granulometric composition of the synthesized product has shown that the predominant fraction has a size of ~ 100 μm. Comparative analysis of the curves of differential scanning calorimetry of microcapsules without filler and with DCPD filling showed that the lower value of the heat flow of about 107 °C is associated not only with the phase transition of the microcapsules, but also with an increase in the evaporation rate of DCPD. A decrease in the peak of the heat flow by about 250 °C is due to both the melting of the capsule shell and the incomplete release and evaporation of DCPD. The decrease in the peak around 275 °C and the increase in its half-width can be attributed to the subsequent simultaneous combustion of the heterogeneous system of DCPD and carbamide-formaldehyde resin.

The development of microcapsules with a carbamide-formaldehyde shell and their application in building materials opens up new possibilities for creating functional composites with self-healing properties.

REFERENCES

1. Cao Z., Xu J. Recent Advances in Self-healing Polymer Materials: Routes and Strategies. *Current Organic Chemistry*. 2024;28(19):e200224227197. https://doi.org/10.2174/0113852728277993240126114403

2. Song H.-S., Rumon M. M. H., Rahman Khan M. M., Jeong J.-H. Toward Intelligent Materials with the Promise of Self-Healing Hydrogels in Flexible Devices. *Polymers*. 2025;17(4):542. https://doi.org/10.3390/polym17040542

3. Hayder R., Kedziora S., Panneer Selvam V. Vitrimer Materials: A Review of Self-Healing Properties. *Solid State Phenomena*. 2024;367(18):79–89. https://doi.org/10.4028/p-awx5i6

4. Lee H.W., Meng L., Ashkpour A., Rahmaninezhad S.A., Iqbal M.I., Mishra G., Hubler M.H., Sales C.M., Farnam Y.A., Najafi A.R. Modeling the uncoupled damage-healing behavior of self-healing cementitious material with phase-field method. *Construction and Building Materials*. 2024;456:139007. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139007

5. Liu Z., Cavalli M.C., Kaestner A., Poulikakos L., Kringos N. Characterizing the Self-Healing Asphalt Materials: A Neutron Imaging Study. *Adv. Eng. Mater*. 2024;26(21):2400764. https://doi.org/10.1002/adem.202400764

6. Md. Abidul Akbari, Abu Zakir Morshed, Md. Saifur Rahman Ruman, Abhishek Sarkar, Md. Shamim Sharear. Enhancing self-healing ability of cementitious materials through super absorbent polymer (SAP). *AIP Conf. Proc*. 2025;3262(1):020015. https://doi.org/10.1063/5.0247081

7. Perevoshchikova A.N., Valtsifer I.V., Kondrashova N.B., Voronina N.S. Study of physical and mechanical properties of concrete with the addition of a multifunctional additive. *Nanotechnology in Construction*. 2024;16(2):170–179. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179. (In Russ.)

8. Zhang J., Sun F., Xu J., Zhao Z.-H., Fu J. Research Progress of Human Biomimetic Self-Healing Materials. *Small*. 2024;21:2408199. https://doi.org/10.1002/smll.202408199

9. Yelwa J.M., Drammeh A., Musa H., Fasanya O.O., Kalu K.M., Abdullahi S., Fall G.A., Aliyu B.M. Advanced material innovations for self-healing high-performance supercapacitors. *Academia Green Energy*. 2025;2:1. https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7555

10. Verma A., Yadav B.C. Recent Advances in Self-Healing Electronic Materials for Energy Harvesting Devices. *In: Sobti R.C. (eds) Role of Science and Technology for Sustainable Future*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5177-8_32

11. Ryzhikh D.A., Pushkarskaya D.V., Serebryakov S.V. Self-healing capsules for polymer composites. *Education. Science. Production: Collection of reports of the XVI International Youth Forum*. 2024;91-95. (In Russ.)

12. Wang S., Urban M.W. Self-healing polymers. *Nat Rev Mater*. 2020;5: 562–583. https://doi.org/10.1038/s41578-020-0202-4

13. Roy S., Kumar V. Study and Analysis of Self Healing Materials with Reversibility and Movement Across Cross Links; Realization of Self Healing Through the Process of Chaos, Complexity and Order. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. 2025;9(12):3. https://doi.org/10.5281/zenodo.14621478

14. Mahedi Azad H.K., Morad Hossain Diganto, Md Zillur Rahman. 13.27 – A comprehensive study on the advancements of self-healing materials. *Comprehensive Materials Processing (Second Edition)*. 2024;579-596. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00235-1

15. Deng P., Wan W., Guo H., Zhang H., Zhou Y., Zhou X. Magnetically Driven Self-Healing Polyurea: Innovative Approaches for Smart Material Design. *J Appl Polym Sci*. 2025;e56741. https://doi.org/10.1002/app.56741

16. Andreu A., Lee H., Kang J., Yoon Y.-J. Self-Healing Materials for 3D Printing. *Adv. Funct. Mater*. 2024;34(30):2315046. https://doi.org/10.1002/adfm.202315046

17. Jamil H., Faizan M., Adeel M., Jesionowski T., Boczkaj G., Balčiūnaitė A. Recent Advances in Polymer Nanocomposites: Unveiling the Frontier of Shape Memory and Self-Healing Properties—A Comprehensive Review. *Molecules*. 2024; 29:1267. https://doi.org/10.3390/molecules29061267

18. Seshsai Kannan, Avin Reji, Parthip Prasooth, Anushree Makwana, Efstratios L. Ntantis. Integrating self-healing materials and IoT for enhanced infrastructure durability and sustainability. *Conference: International Conference on Advancements and Innovations in Mechanical, Aerospace and Civil Engineering (AIMACE)*. 2025.

19. Artamonova O.V., Kulikova O.Ya. Self-healing mechanisms of modern composites. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2024;2(41):40-58. (In Russ.)

20. Hossein S.A., Yue L., Jun M., Jun-Jie Z., Guangtong H., Yan Z. An innovative sludge-derived capsule for self-healing cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*. 2024;480:144120. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144120

21. Ovchinnikova V., Medynskaya A., Kasatikova A., Abrashov A. Testing as a way to assess the quality of "smart" self-healing coatings. *The role of technical regulation and standardization in the era of the digital economy: Proceedings of the VI international scientific and practical conference of young scientists*. 2024;236-242. (In Russ.)

22. Inozemtsev S. S., Do T. Ch., Korolev E. V. Domestic experience in research in the field of building materials with self-healing function. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov.* 2022;1:8-22. https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-1-8-22 (In Russ.)

23. Ukrainskaya E. V., Ishchenko T. L. Self-healing paint and varnish coatings. *Promising resource-saving technologies for the development of the forestry complex: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students*. 2023;189-192. (In Russ.)

24. Tolstoy A., Gridchin A., Glagolev E., Lesovik R., Shapovalov N. Efficient Construction Composites for Construction in the North and the Arctic. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;147:15–22. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1_3

25. Lim G. Q. V., Chong W. C., Chong K. C. Self-healing Materials: Unlocking New Potential in Membrane Technology. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*. 2024;28:1-8. https://doi.org/10.11113/jamst.v28n3.299

26. Veeramani N., Kumar D. R., Manikandanath N. T., Ganesh A. S., John S., Srinivas G. Investigation of microcapsules based self-healing composites embedded with carbon nanotubes for improved healing efficiency. *Journal of Polymer Research*. 2024;31:312. https://doi.org/10.1007/s10965-024-04155-5

27. Chen S., Liu X., Miao Y., Ge S., Li S., Liu L., Hou L., Rezakazemi, M., Aminabhavi T. M., Fan W. Self-healing polyurethane/cellulose nanocrystal composite fibers with fatigue and aging resistance for smart wearable elastic yarns. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2024;8:8. https://doi.org/10.1007/s42114-024-01089-w

28. Sun N., Liu X., Lv W., Xu C., Zhang A., Sun P. Composite Hydrogels with Rapid Self-Healing, Stretchable, Moldable and Antibacterial Properties Based on PVA/ε-Poly-L-lysine/Hyaluronic Acid. *Molecules*. 2024;29:4666. https://doi.org/10.3390/molecules29194666

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia I. Cherkashina – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher-Head of the Research Laboratory "Development of Scientific and Technical Foundations for the Creation of Polymer Systems from Renewable Plant Raw Materials", Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, natalipv13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0161-3266

Vyacheslav I. Pavlenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, belpavlenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3464-1880

Artem Yu. Ruchiy – Research engineer, Research Laboratory, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, artiem.ruchii.99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-2617-5624

Sergey V. Serebryakov – Junior Researcher, Research Laboratory, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, serebr43@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0008-0284-6647

Roman A. Barinov – student, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, barinovroman216@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8810-8858

AUTHORS CONTRIBUTION

Cherkashina N.I. – scientific supervision; setting the goals and objectives of the study; analysis of the research results; revision of the article text.

Pavlenko V.I. – development of the research methodology; analysis of the research results; conclusions of the article.

Ruchiy A.Yu. – conducting the experimental part of the study; analysis of the research results; writing the initial text of the article.

Serebryakov S.V. – conducting the experimental part of the study; graphical and tabular presentation of the results.

Barinov R.A. – conducting a literature review; conducting the experimental part of the study.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 07.03.2025; approved after reviewing 06.04.2025; accepted for publication 09.04.2025.

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Научная статья / Original article
УДК 54.057; 66.095.26
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200

CC BY 4.0

Синтез самозалечивающихся микрокапсул на основе дициклопентадиена

Наталья Игоревна Черкашина, Вячеслав Иванович Павленко, Сергей Викторович Серебряков, Артём Юрьевич Ручий*, Роман Алексеевич Баринов

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на изучение возможности синтеза микрокапсул на основе карбамидформальдегидной оболочки с содержанием дициклопентадиена. **Материалы и методы исследования.** Для синтеза карбамид-формальдегидных микрокапсул использовались следующие реактивы: вода дистиллированная; карбамид (мочевина) со степенью чистоты 99%; формалин «технический»; гидроксид натрия «ЧДА»; масло нима (NSO – neem seed oil); полисорбат Twin-80; дициклопентадиен со степенью чистоты – 98%; спирт этиловый абсолютированный; соляная кислота «ЧДА». **Результаты и обсуждение.** Органические микрокапсулы были получены путём полимеризации карбамид-формальдегидной смолы. Заполнение микрокапсул дициклопентадиеном осуществили посредством установления равновесия между концентрированным раствором дициклопентадиена в спирте и содержимым капсул. Средний размер капсул составил ~100 мкм. Капсулы имеют сферическую форму и сплошную оболочку. ИК-Фурье спектры подтвердили требуемые составы оболочки капсулы и наполнителя. Анализ кривой ДСК показал, что наполнение капсул дициклопентадиеном прошло успешно. **Заключение.** Результатом проделанной работы является успешный синтез микрокапсул на основе карбамидформальдегидной оболочки. Синтез микрокапсул и их внедрение в технологии строительных материалов открывают новые перспективы для создания композитов с эффектом самозалечивания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самозалечивание, самовосстановление, формальдегид, карбамид, дициклопентадиен, микрокапсулы, синтез

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10033 https://rscf.ru/project/24-79-10033/ с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Черкашина Н.И., Павленко В.И., Ручий А.Ю., Серебряков С.В., Баринов Р.А. Синтез самозалечивающихся микрокапсул на основе дициклопентадиена. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):189–200. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200. – EDN: XIVHFT.

Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene

Natalia I. Cherkashina, Vyacheslav I. Pavlenko, Sergey V. Serebryakov, Artyom Yu. Ruchiy*, Roman A. Barinov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

* Corresponding author: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The study aims to explore the possibility of creating microcapsules using a carbamide-formaldehyde shell (coat) that contains dicyclopentadiene. **Materials and methods.** The following reagents were used to synthesize carbamide-formaldehyde

© Черкашина Н.И., Павленко В.И., Ручий А.Ю., Серебряков С.В., Баринов Р.А. 2025

microcapsules: distilled water; carbamide (urea) with a purity of 99%; technical formalin; sodium hydroxide (Pro Analysis «PA»); neem seed oil (NSO); polysorbate Twin-80; dicyclopentadiene with a purity of 98%; absolute ethyl alcohol (dehydrated); hydrochloric acid (Pro Analysis «PA»). **Results and discussion.** Organic microcapsules were obtained by polymerization of carbamide-formaldehyde resin. Filling of microcapsules with dicyclopentadiene has been carried out by establishing equilibrium between concentrated solution of dicyclopentadiene in alcohol and capsule contents. Average size of capsules was ~100 μm. Capsules have spherical shape and solid shell. Fourier-transform IR (FTIR) spectrum confirmed required compositions of capsule shell and filler. Analysis of DSC curve (Differential scanning calorimetry curve) showed that filling of capsules with dicyclopentadiene was successful. **Conclusion.** The result of the research done is the successful synthesis of microcapsules using a carbamide-formaldehyde shell. This synthesis of microcapsules and its application in building materials technology opens up new prospects for creating composites with self-healing properties.

KEYWORDS: self-healing, self-restoration, formaldehyde, carbamide (urea), dicyclopentadiene, microcapsules, synthesis

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-79-10033 https://rscf.ru/project/24-79-10033/ using equipment based at the High Technology Center of BSTU named after V. G. Shukhov.

FOR CITATION:
Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Ruchiy A.Yu., Serebryakov S.V., Barinov R.A. Synthesis of self-healing microcapsules based on dicyclopentadiene. *Nanotechnology in Construction.* 2025;17(2):189–200. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-189-200. – EDN: XIVHFT.

ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования материалов различного состава с эффектом самозалечивания (самовосстановления) представляют собой перспективное направление в науке [1–3]. Такие композиции находят применение не только в сфере строительных материалов [4–7], но и в биоинженерии [8] и электронике [9–10], обеспечивая долговечность и устойчивость конструкциям на их основе к механическим повреждениям.

Самовосстановление – свойство материала или системы частично или полностью возобновлять свою изначальную структуру и функциональность после физико-механических воздействий (повреждений) [11–14]. Самозалечивающиеся материалы способны восстанавливать свою монолитность [15–16] после повреждений за счет внедрения в их структуру микро- и/или нанокапсул, содержащих залечивающие агенты и катализаторы, которые при возникновении дефекта реагируют с последующим отверждением [17–18]. Оболочка микрокапсул может быть выполнена как из минеральных [19], так и из полимерных [20] материалов и должна иметь определенные прочностные характеристики [21]. Она должна быть достаточно прочной, чтобы не повредиться во время изготовления композиционных материалов и в то же время она должна разрушаться при возникновении различного рода дефектов. Анализ литературных данных показал, что выбор компонентов для синтеза микрокапсул зависит от цели и области их дальнейшего использования [22, 23].

Так, в исследовании [24] ученые описали метод получения самовосстанавливающихся пористых бетонных композитов. Эффект самозалечивания достигается как за счет высокоплотной структуры материала, так и за счет наличия активного минерала (сульфида железа) в порах наполнителя. При образовании дефекта в готовом изделии повреждаются поры, сульфид железа реагирует с гидратной водой, находящейся в заполнителе, с образованием железистого эттрингита, который затвердевает, затягивая собой образовавшуюся трещину.

В статье [25] исследователи рассмотрели механизмы самовосстановления полимерных мембран для фильтрации воды. Ученые выделили два вида самозалечивания: внешнее, зависящее от встроенных в матрицу мембраны микрокапсул с залечивающим агентом и катализатора, и внутреннее, зависящее от динамических связей между полимерами, которые запускают автономное заживление посредством обратимых химических взаимодействий (при разрыве связей происходят конформационные изменения, приводящие к контакту концов низкомолекулярных реакционноспособных цепей).

В работе [26] ученые исследовали физические свойства самовосстанавливающегося композита на основе эпоксидной смолы с добавкой мочевиноформальдегидных микрокапсул с мономером дициклопентадиена, многостенных углеродных нанотрубок (MWCNT) и углеродных волокон. В результате работы они установили, что данный способ модифицирования значительно повысил прочность на разрыв материала без ущерба для эффективности самовосстановления (90%) по сравнению с немодифицированными образцами (72%). Также материал показал перспективные значения более высокой температуры стеклования (85°C) в сочетании с улучшенной эффективностью отверждения (90%), что можно считать новизной данной работы.

В исследовании [27] представлен метод получения самовосстанавливающихся композитных полиуретановых волокон с добавлением экологически чистых нанокристаллов целлюлозы (CNC) и исследованы некоторые физические свойства материала. По сравнению с полиуретановыми волокнами без CNC, удлинение при разрыве и прочность на разрыв композитных волокон увеличились на 34% и 18% соответственно. После испытания на разрез трещины на поверхности самовосстанавливающихся композитных волокон из полиуретана с CNC исчезли, а удлинение при разрыве и прочность на разрыв увеличились на 57% и 128% соответственно.

Целью исследования статьи [28] является получение композиционных гидрогелей (PBLH) на основе поливинилового спирта (ПВС), бората (B), ε-поли-L-лизина (EPL) и гиалуроновой кислоты (ГК) со сверхбыстрой способностью к самовосстановлению, эластичностью и способностью к формованию с помощью эффективного одноэтапного метода. Изготовленные гидрогели показали выдающиеся характеристики быстрого самовосстановления, растягиваемости и формуемости – могли полностью восстанавливаться в течение 1 мин и принимать различные заданные формы.

Таким образом, эффекта самозалечивания можно достичь как в минеральных, так и в органических строительных материалах, что способствует продлению срока службы производственных элементов, уменьшению расходов на их обслуживание и ремонт, а также повышению безопасности конструкции или изделия в целом. Целью данной работы является синтез самозалечивающихся микрокапсул на основе карбамидформальдегидной оболочки с дициклопентадиеном. В данной статье описан процесс синтеза микрокапсул, проведен анализ их гранулометрического состава, исследована микроструктура продута синтеза. Также проведен анализ кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) микрокапсул без наполнителя и с наполнением дициклопентадиеном.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы

Для получения карбамид-формальдегидных микрокапсул в работе использовались следующие реактивы: вода дистиллированная согласно ГОСТ 58144-2018; карбамид (мочевина) со степенью чистоты 99% производства компании «Macklin Inc.», Китай; формалин «технический» согласно ГОСТ 1625-89 производства АО «ЛенРеактив», Россия, Санкт-Петербург; гидроксид натрия «ЧДА» производства АО «Каустик», Россия, Волгоград; масло нима (NSO – neem seed oil) производства компании «Shree Baidyanath Ayurved Bhawan Pvt., Ltd.», Индия; полисорбат Twin-80 производства «Jaikisan Agrotech India Pvt., Ltd.», Индия; дициклопентадиен со степенью чистоты 98% производства «Shanghai Acmec Biochemical Technology Co., Ltd.»; спирт этиловый абсолютированный производства АО «РФК» Россия, Москва; соляная кислота «ЧДА» производства АО «Каустик», Россия, Волгоград.

Оборудование и методы исследования

Измерение массы исходных компонентов и продуктов синтеза осуществлялось на лабораторных весах ВК-600 производства АО «МАССА-К», Россия с дискретностью отсчета 0,01 г.

Для проведения синтеза использовали магнитную мешалку с нагревом и точной установкой температуры 5Drops-HSS-2 «HS5S full set» производства «Joanlab Equipment Co., Ltd.», Китай. Максимальная температура нагрева – 260 °C.

Смешение компонентов синтеза осуществляли при помощи лабораторной верхнеприводной мешалки «EUROSTAR 20 high speed digital» производства «НВ-Лаб», Россия. Диапазон частоты вращения – от 0/150 до 6000 об/мин.

Для получения деионизированной воды использовали деионизатор воды ДВ – 1М производства ООО «ЦветХром», Россия с удельной проводимостью при 25 °C менее 0,1 мкСм/см и производительностью до 10 л/ч.

Гранулометрический анализ полученных микрокапсул проводили на лазерном дифракционном анализаторе Analysette 22 NanoTec plus производства компании «Fritsch», Германия с диапазоном измерения размеров частиц 0,01–2000 мкм.

Микроструктура полученных продуктов осуществлялась на оптическом микроскопе Jenaval с объективами CarlZeiss JenaGF Planachromat 3,2x/0,06 ∞/-A и CarlZeiss JenaGF Planachromat 12,5x/0,25 ∞/-A производства компании «Carl Zeiss Jena», Германия.

ИК-Фурье спектр поглощения полученных микрокапсул получали при помощи инфракрасного спектрометра модели Sintecon IR10 в диапазоневолновых колебаний 5000 – 500 $см^{-1}$ со спектральным разрешением $\leqslant 2$ $см^{-1}$.

Дифференциальную сканирующую калориметрию проводили при помощи прибора синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter производства «Netzsch», Германия. Диапазон температур анализа составил 20–350 °C, скорость нагрева – 10 град./мин. Среда испытания приближена к воздушной среде: 21% O_2, 79% Ar.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описание технологии создания карбамид-формальдегидных капсул

Формалин массой 11,1 г с концентрацией формальдегида ~30%, подщелоченный до 10%-ного раствора NaOH, смешали с 2,0 г мочевины и разбавили деионизированной водой, предварительно нагретой до 60 °С, до 200 мл. Раствор перемешивали погружной верхнеприводной мешалкой при 2000 об/мин в течение 2 ч до легкого помутнения раствора. После чего в раствор ввели 1 г смеси масла нима с полисорбатом Twin-80 (концентрация последнего – 0,1%). Температура в системе увеличилась с 60 до 70 °С. После 1 ч перемешивания значение pH раствора снизилось 20%-ной соляной кислотой с 11–10 до 3–4, при этом цвет раствора изменился с желтого на белый. Перемешивание продолжалось до формирования заметных полимерных частиц и резкого снижения объема раствора.

Процесс растворения карбамида в формальдегиде эндотермичен. Условия проведения реакции никак не влияют на получение первичных продуктов реакции, которые представляют собой карбидоксиметиленовые (метилольные) соединения. Диамид угольной кислоты (рис. 1) теоретически способен присоединить 4 молекулы формальдегида, образуя тетраметилолкарбамид (рис. 2).

Соотношение констант скоростей реакции получения моно-, ди- и триметилолкарбинола 9:3:1, содержание тетраметилолкарбамида в конечном итоге находится в пределах погрешности и потому не учитывалось. Массовое соотношение карбамида к формальдегиду 1:2 обеспечивает оптимальное равновесие системы для образования наибольшего количества триметилолкарбамида в растворе. Также установлено, что при увеличении содержания фор-

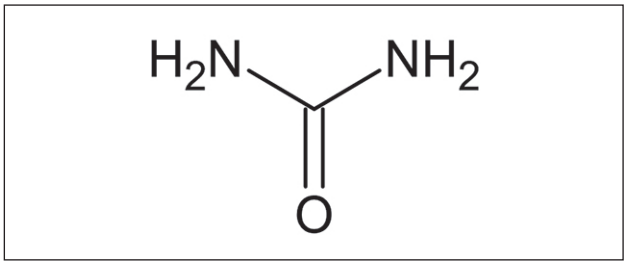


Рис. 1. Структурная формула диамида угольной кислоты (урея, мочевина, карбамид)

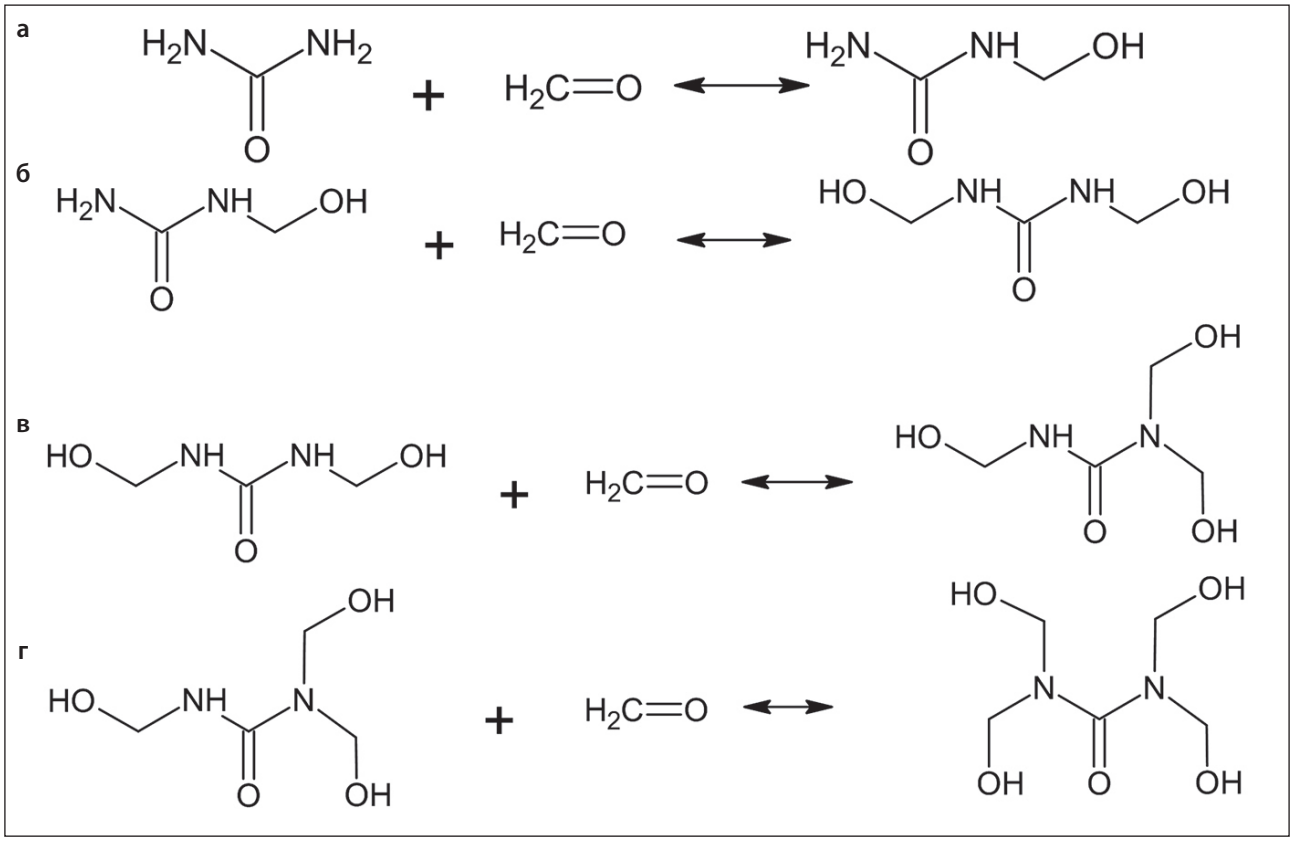


Рис. 2. Реакции получения: а) монометилолкарбамида; б) диметилолкарбамида; в) тритметилолкарбамида; г) тетраметилолкарбамида из карбамида и формальдегида

мальдегида в растворе все равно прореагирует примерно 2,8 моль формальдегида на 1 моль карбамида.

Наибольшее практическое значение имели моно- и диметилолкарбамид за счет способности образовывать полимеры линейного строения. Реакции полимеризации моно- и диметилолкарбамида представлены ниже (рис. 3).

При отверждении смолы также произошла данная реакция между свободными метилольными группами. Параллельно может происходить полимеризация через взаимодействие кетонной и гидроксильной группы (рис. 3 в).

Полимеризация тритметилолкарбамида (рис. 4) также способна идти как через гидроксильные, так

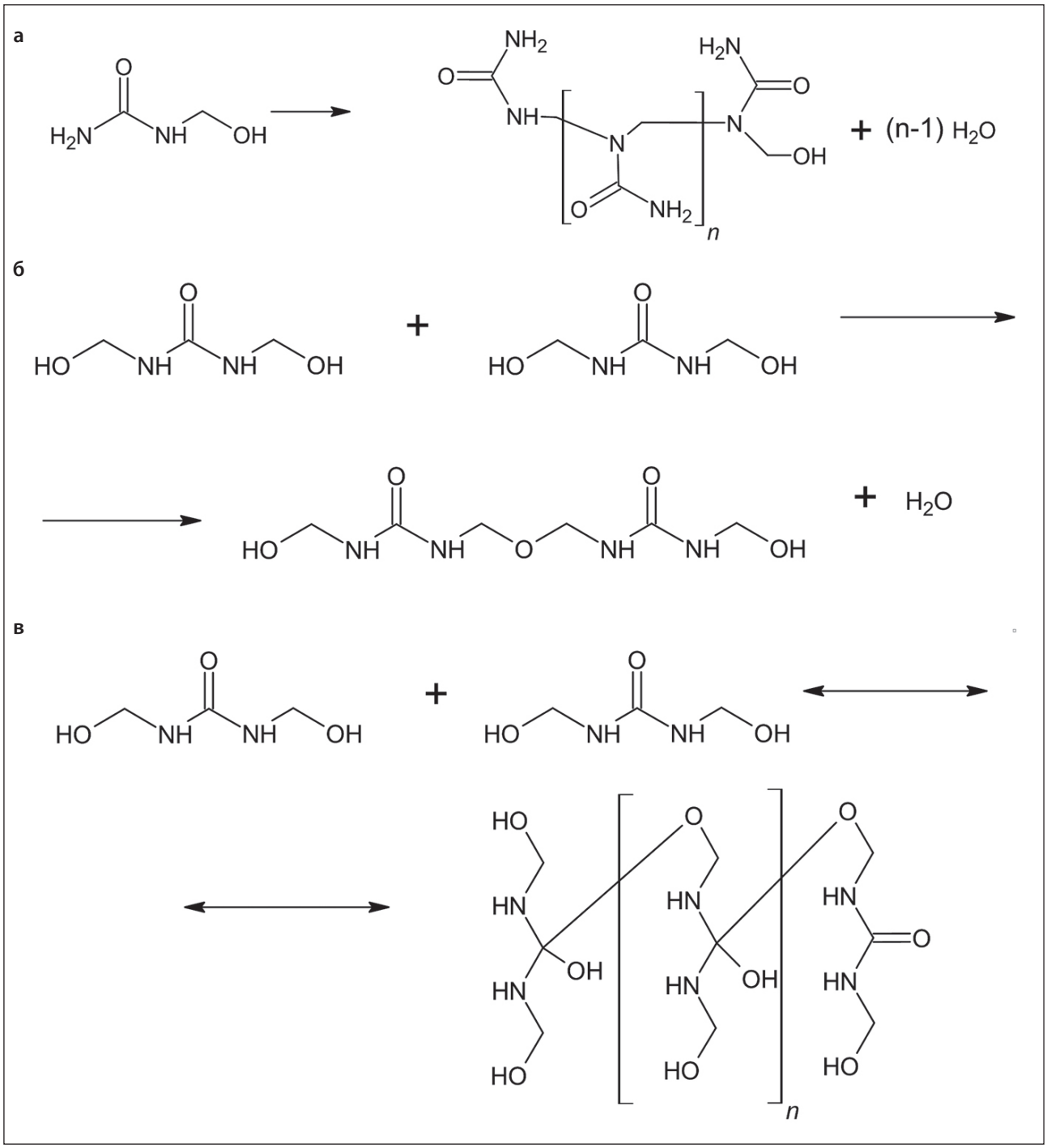


Рис. 3. Реакции полимеризации: а) монометилолкарбомида; б) диметилолкарбомида; в) диметилолкарбомида через взаимодействие кетонной и гидроксильной группы

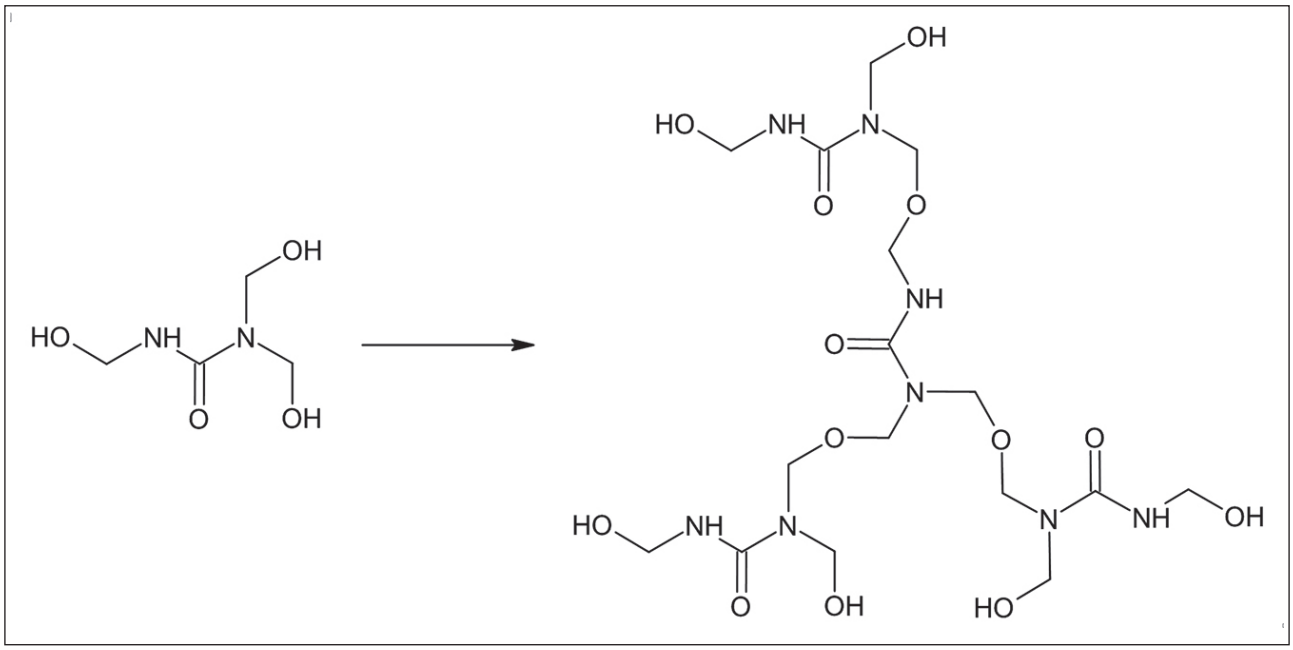


Рис. 4. Реакция полимеризации триметилолкарбамида

и через кетонные группы, в ходе реакции образуются полимеры разветвленной структуры независимо от того, через какие функциональные группы идет полимеризация.

Наличие подобных разветвленных соединений оказало положительное воздействие на прочностные характеристики конечных микрокапсул благодаря связыванию линейных структур между собой.

В растворе данные реакции произошли при нагревании в кислой среде. Обычно кластеры карбмидо-формальдегидных полимеров не превышают молекулярную массу в 700 а.е.м.

За счет метилольных групп получившиеся соединения хорошо растворимы в воде и для придания им формы микрокапсулы требуется вводить вещества с функциональными группами, способными взаимодействовать с первичными аминами для образования устойчивых центров полимеризации. Для этих целей в смесь ввели масло нима (NSO), в состав которого входит нимбин. За счет сложной пространственной структуры он способен взаимодейсивовать с метилолкарбамидом через кетонную группу, присоединяя первичный амин (рис. 5).

Размер микрокапсул регулировали скоростью оборотов верхнеприводного миксера и стабилизировали за счет полисорбата Twin-80. Окончательное отверждение карбамид-формальдегидных смол осуществляли в кислой среде при значениях pH 3–4. Вес полученных капсул составил 20,4 г.

Следующим шагом являлась экстракция нимбина. Экстракция проводилась в аппарате Сокслета с 64% водным раствором этилового спирта в качестве растворителя. В ходе экстракции из микрокапсул выделилось масло, окрасившее спирт в белый цвет. Промывка капсул осуществлялась на полимерном сите (размер отверстий 106 мкм) спиртом и деионизированной водой. Зафиксировано уменьшение массы капсул в 1,17 раза, которая составила 18,6 г. Столь незначительное изменение массы связано с замещением содержимого капсулы на растворитель.

Заполнение капсул функциональным содержимым происходило в кипящем, насыщенном (50%-ном) растворе дициклопентадиена в этиловом спирте в течение 6 ч. Структурная формула дициклопентадиена представлена на рис. 6.

Гранулометрический анализ

Результат гранулометрического анализа полученных микрокапсул представлен на рис. 7. Исходя из полученных данных, на графике видно, что распределение размеров полученных карбамид-формальдегидных микрокапсул описывается тримодальной системой с первой модой при 0,81 мкм, второй модой при 8,80 мкм и третьей модой при 105,97 мкм. Преобладающая фракция микрокапсул имеет размеры ~100 мкм. Удельная поверхность микрокапсул – 8210 $см^2/см^3$.

Микроскопический анализ

Морфологию полученных микрокапсул исследовали методом оптической микроскопии в проходящем свете, результат которой представлен на рис. 8.

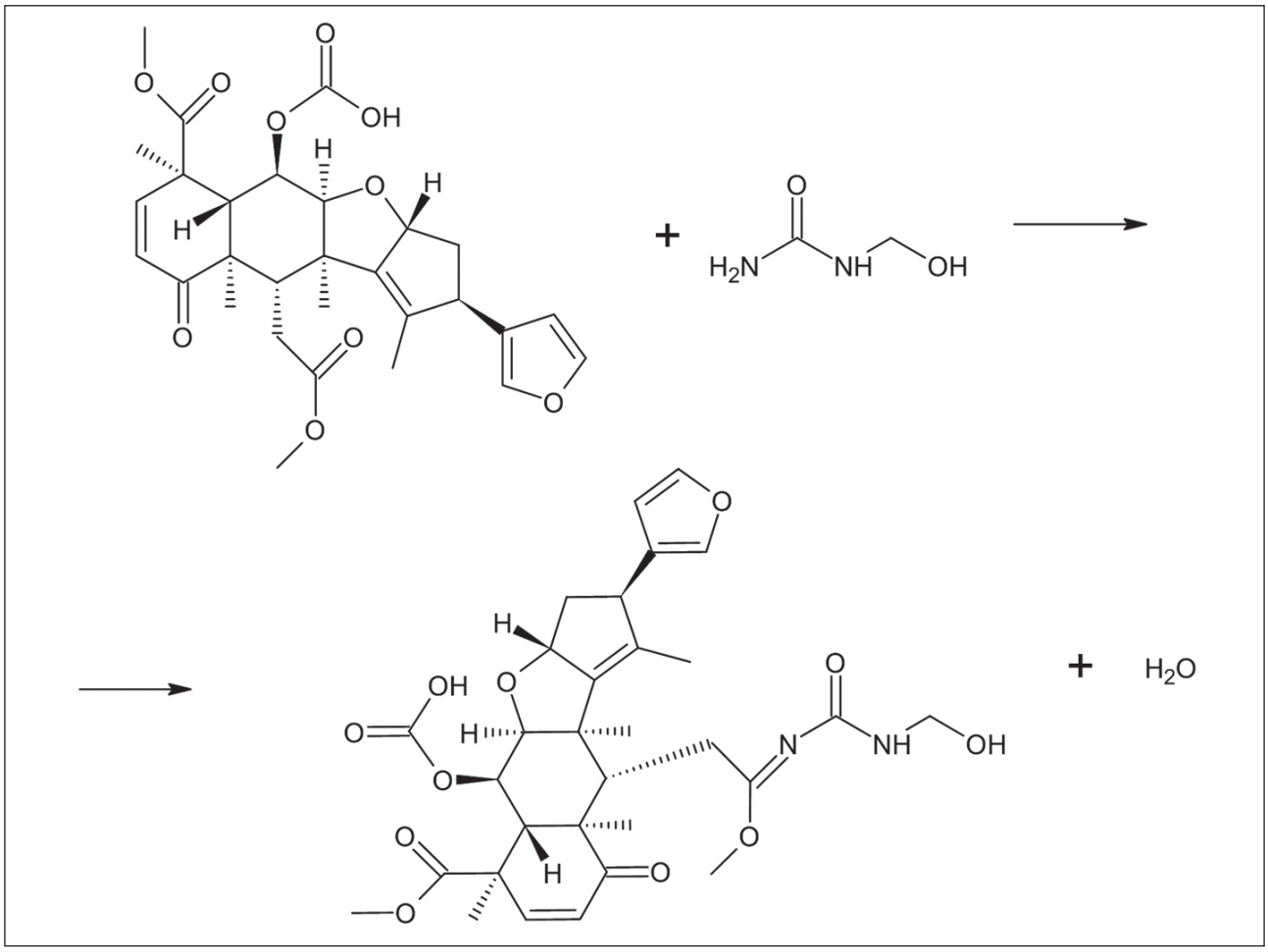


Рис. 5. Реакция взаимодействия нимбина с метилолкарбамидом

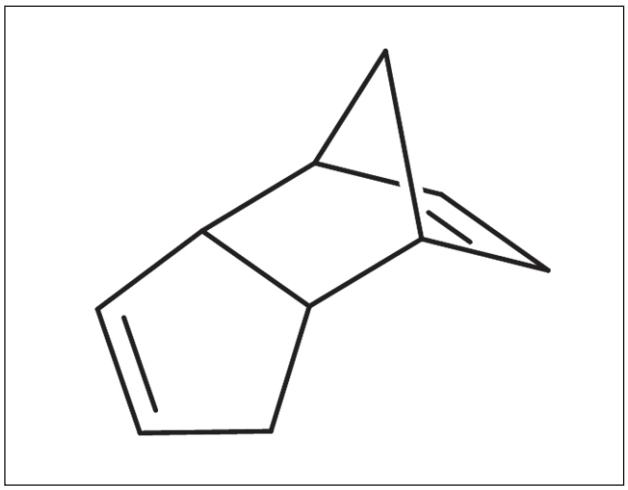


Рис. 6. Структурная формула дициклопентадиена

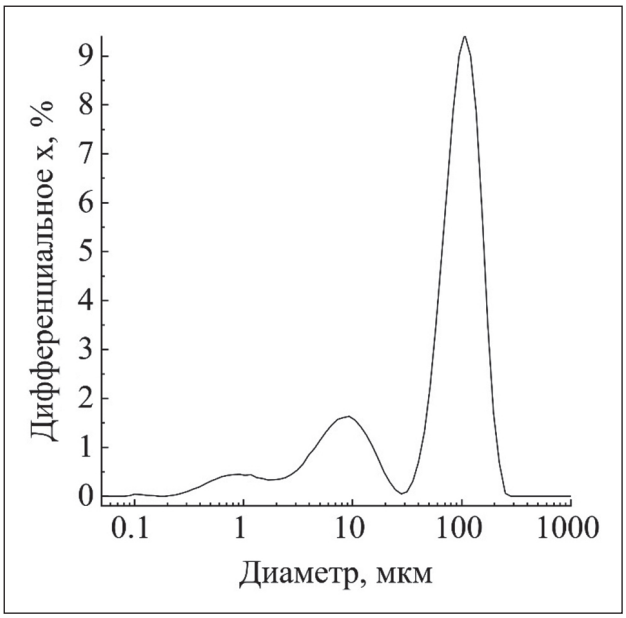


Рис. 7. Гранулометрический анализ карбамид-формальдегидных микрокапсул

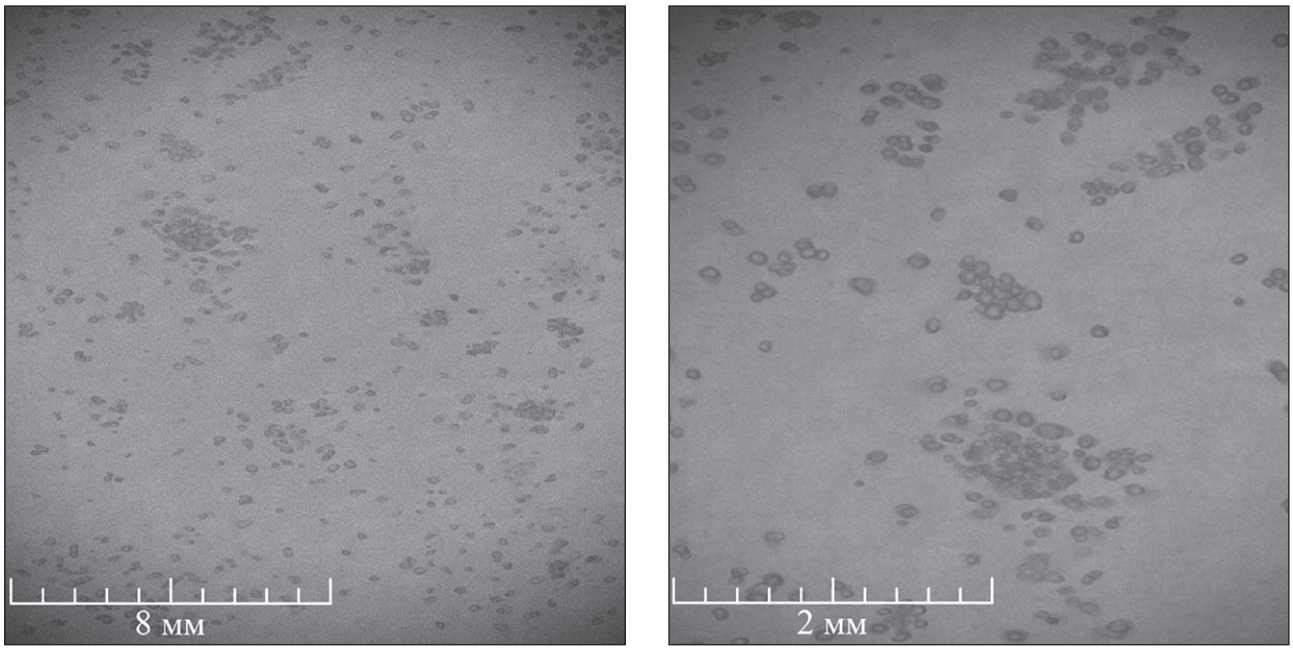


Рис. 8. Микроскопические изображения карбамид-формальдегидных микрокапсул

В ходе выполнения экспериментов выяснили, что деформации микрокапсул не произошло. На рис. отчетливо видны сферические частицы продукта синтеза со сплошной оболочкой. Также стоит отметить, что средний размер микрокапсул согласуется с гранулометрическим анализом (100 мкм).

Исследование инфракрасного фурье-спектра

ИК-Фурье спектр карбамидформальдегидной пленки (рис. 9) указывает на высокое содержание аминных групп в структуре полимера. Сильный пик в области 1694 $см^{-1}$ указывает на валентные колебания NH_2 что свидетельствует о наличии преимущественно монометилолкарбамида в полимерной системе.

Также на спектре наблюдается пик при 1586 $см^{-1}$ (продольная деформация амидной связи), обычно данный пик не используется для анализа органических веществ, однако в данном случае он косвенно указывает на полимеризацию смолы. Высота пика зависит от концентрации и в сравнении с пиком в районе 746 $см^{-1}$ (спиральная деформация амидной связи), который тоже зависит от концентрации, можно судить о наличии углеродных каркасов на концах аминных связей, составляющих цепочку полимера. По пикам в районе 799 и 1240 $см^{-1}$ можно с уверенностью утверждать о связи кислорода с углеродом, которая образует кетонную группу.

ИК-Фурье спектр дициклопентадиена (рис. 10) показал характерные для циклических соединений пики в области ~1250–600 $см^{-1}$. Наличие пиков при 1338 и 1253 $см^{-1}$ при условии, что соотношение их интенсивностей равно 2:1, свидетельствует о наличии связи $C–(C)_3$, характерной для дициклопентадиена. Пик высокой интенсивности при 764 $см^{-1}$ указывает на внеплоскостные 1,2-замещенные связи в цикле.

Анализ дифференциальной сканирующей калориметрии

Кривая ДСК карбамид-формальдегидных капсул (рис. 11) демонстрирует три эндотермических пика при 107,5 °C; 257,1 °C; 295,9 °C и один экзотермический при 278,9 °C. Пик при 107,5 °C указывает на фазовый переход с небольшим стеклованием структуры. Последующий пик при 257,1 °C указывает на полное расплавление пептида с резким окислением при 278,9 °C и деструкцией с выделением летучих веществ при 295,9°C.

Кривая ДСК микрокапсул с наполнением ДЦПД представлена на рис. 12 а. Снижение теплового потока эндотермического пика при 106,5–107,5 °C связано с увеличением скорости испарения ДЦПД, что сопровождается потерей массы. Снижение пиков в области 251,3–278,9 °C связано с большими массовыми потерями ввиду полного сгорания ДЦПД при расплавлении карбамидоформальдегидной смолы.

При сопоставлении двух кривых ДСК (рис. 6 б) видна небольшая разница при общей схожести графиков, что свидетельствует об удачном заполнении капсул дициклопентадиеном.

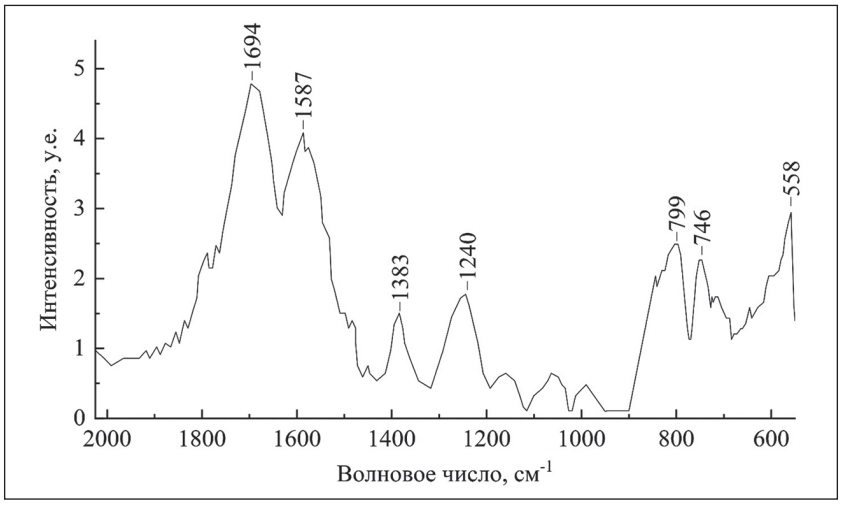


Рис. 9. ИК-Фурье спектр карбамид-формальдегидной пленки

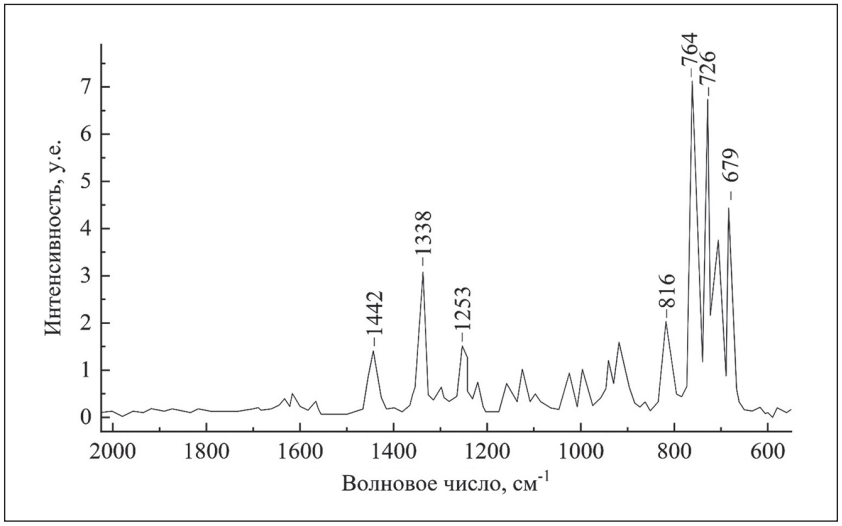


Рис. 10. ИК-Фурье спектр дициклопентадиена

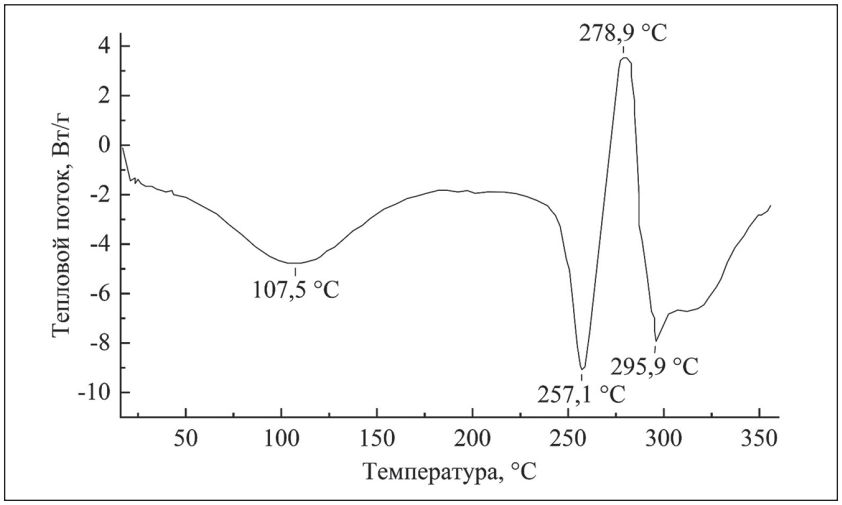


Рис. 11. Кривая ДСК карбамид-формальдегидных микрокапсул

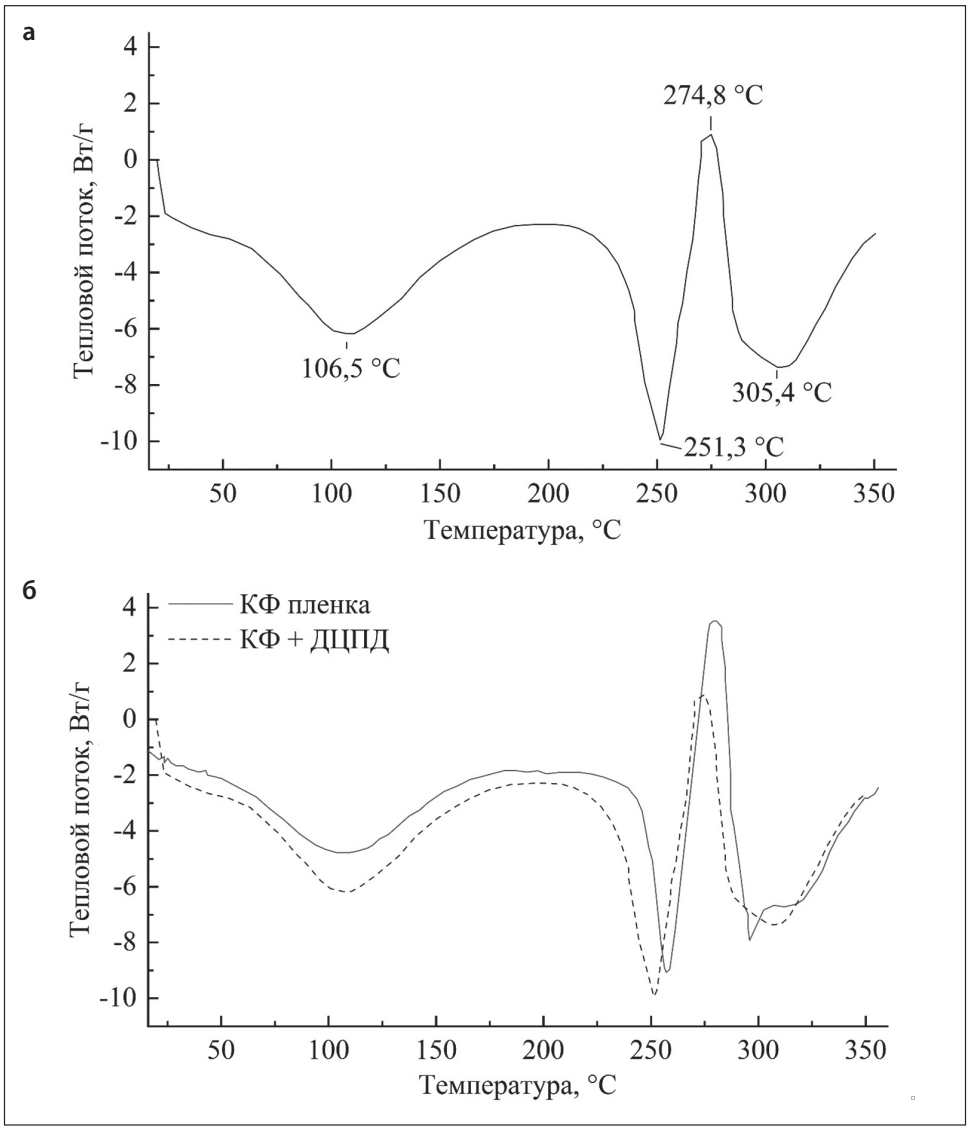


Рис. 12. Кривые ДСК: а) карбамидформальдегидных капсул с дициклопентадиеном; б) сравнения карбамидформальдегидных капсул без наполнителя (КФ пленка) и карбамидформальдегидными капсулами, содержащими дициклопентадиен (КФ + ДЦПД)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проделанной работы является успешный синтез микрокапсул на основе карбамидформальдегидной оболочки, что подтверждается ИК-Фурье спектроскопией. Микроскопический анализ полученного продукта показал отсутствие повреждений, а также то, что микрокапсулы имеют сплошную сферическую оболочку. Анализ гранулометрического состава продукта синтеза показал, что преобладающая фракция имеет размеры ~100 мкм. Сравнительный анализ кривых дифференциальной сканирующей калориметрии микрокапсул без наполнителя и с наполнением ДЦПД показал, что меньшее значение теплового потока около 107 °C связано не только с фазовым переходом микрокапсул, но и с увеличением скорости испарения ДЦПД. Снижение пика теплового потока около 250 °C связано с тем, что помимо плавления оболочки капсул происходит неполное выделение ДЦПД из капсул и его испарение. Снижение пика около 275 °C и увеличение его полуширины связано с последующим одновременным горением гетерогенной системы ДЦПД и карбамидформальдегидной смолы.

Создание микрокапсул с карбамидформальдегидной оболочкой и их последующее внедрение в технологии строительных материалов определяют новые возможности для разработки функциональных композитов с эффектом самозалечивания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cao Z., Xu J. Recent Advances in Self-healing Polymer Materials: Routes and Strategies. *Current Organic Chemistry*. 2024;28(19):e200224227197. https://doi.org/10.2174/0113852728277993240126114403

2. Song H.-S., Rumon M.M.H., Rahman Khan M.M., Jeong J.-H. Toward Intelligent Materials with the Promise of Self-Healing Hydrogels in Flexible Devices. *Polymers*. 2025;17(4):542. https://doi.org/10.3390/polym17040542

3. Hayder R., Kedziora S., Panneer Selvam V. Vitrimer Materials: A Review of Self-Healing Properties. *Solid State Phenomena*. 2024;367(18):79–89. https://doi.org/10.4028/p-awx5i6

4. Lee H.W., Meng L., Ashkpour A., Rahmaninezhad S.A., Iqbal M.I., Mishra G., Hubler M.H., Sales C.M., Farnam Y.A., Najafi A.R. Modeling the uncoupled damage-healing behavior of self-healing cementitious material with phase-field method. *Construction and Building Materials*. 2024;456:139007. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139007

5. Liu Z., Cavalli M. C., Kaestner A., Poulikakos L., Kringos N. Characterizing the Self-Healing Asphalt Materials: A Neutron Imaging Study. *Adv. Eng. Mater*. 2024;26(21):2400764. https://doi.org/10.1002/adem.202400764

6. Md. Abidul Akbari, Abu Zakir Morshed, Md. Saifur Rahman Ruman, Abhishek Sarkar, Md. Shamim Sharear. Enhancing self-healing ability of cementitious materials through super absorbent polymer (SAP). *AIP Conf. Proc*. 2025;3262(1):020015. https://doi.org/10.1063/5.0247081

7. Перевощикова А.Н., Вальцифер И.В., Кондрашова Н.Б., Воронина Н.С. Исследование физико-механических свойств бетона с добавлением многофункциональной добавки. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(2):170–179. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-170-179

8. Zhang J., Sun F., Xu J., Zhao Z.-H., Fu J. Research Progress of Human Biomimetic Self-Healing Materials. *Small*. 2024;21:2408199. https://doi.org/10.1002/smll.202408199

9. Yelwa J.M., Drammeh A., Musa H., Fasanya O.O., Kalu K.M., Abdullahi S., Fall G.A., Aliyu B.M. Advanced material innovations for self-healing high-performance supercapacitors. *Academia Green Energy*. 2025;2:1. https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7555

10. Verma A., Yadav B.C. Recent Advances in Self-Healing Electronic Materials for Energy Harvesting Devices. *In: Sobti R.C. (eds) Role of Science and Technology for Sustainable Future*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5177-8_32

11. Рыжих Д.А., Пушкарская Д.В., Серебряков С.В. Самозалечивающие капсулы для полимерных композитов. *Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XVI Международного молодежного форума*. 2024;91-95.

12. Wang S., Urban M.W. Self-healing polymers. *Nat Rev Mater*. 2020;5: 562–583. https://doi.org/10.1038/s41578-020-0202-4

13. Roy S., Kumar V. Study and Analysis of Self Healing Materials with Reversibility and Movement Across Cross Links; Realization of Self Healing Through the Process of Chaos, Complexity and Order. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. 2025;9(12):3. https://doi.org/10.5281/zenodo.14621478

14. Mahedi Azad H.K., Morad Hossain Diganto, Md Zillur Rahman. 13.27 – A comprehensive study on the advancements of self-healing materials. *Comprehensive Materials Processing (Second Edition)*. 2024;579-596. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00235-1

15. Deng P., Wan W., Guo H., Zhang H., Zhou Y., Zhou X. Magnetically Driven Self-Healing Polyurea: Innovative Approaches for Smart Material Design. *J Appl Polym Sci*. 2025;e56741. https://doi.org/10.1002/app.56741

16. Andreu A., Lee H., Kang J., Yoon Y.-J. Self-Healing Materials for 3D Printing. *Adv. Funct. Mater*. 2024;34(30):2315046. https://doi.org/10.1002/adfm.202315046

17. Jamil H., Faizan M., Adeel M., Jesionowski T., Boczkaj G., Balčiūnaitė A. Recent Advances in Polymer Nanocomposites: Unveiling the Frontier of Shape Memory and Self-Healing Properties – A Comprehensive Review. *Molecules*. 2024; 29:1267. https://doi.org/10.3390/molecules29061267

18. Seshsai Kannan, Avin Reji, Parthip Prasooth, Anushree Makwana, Efstratios L. Ntantis. Integrating self-healing materials and IoT for enhanced infrastructure durability and sustainability. *Conference: International Conference on Advancements and Innovations in Mechanical, Aerospace and Civil Engineering (AIMACE)*. 2025.

19. Артамонова О.В., Куликова О.Я. Механизмы самовосстановления современных композитов. *Химия, физика и механика материалов*. 2024;2(41):40-58.

20. Hossein S.A., Yue L., Jun M., Jun-Jie Z., Guangtong H., Yan Z. An innovative sludge-derived capsule for self-healing cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*. 2024;480:144120. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144120

21. Овчинникова В., Медынская А., Касатикова А., Абрашов А. Испытание как способ оценки качества «умных» самовосстанавливающихся покрытий. *Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: Материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых*. 2024;236-242.

22. Иноземцев С.С., До Т.Ч., Королев Е.В. Отечественный опыт исследования в области строительных материалов с функцией самовосстановления. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2022;1:8-22. https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-1-8-22

23. Украинская Е.В., Ищенко Т.Л. Самовосстанавливающиеся лакокрасочные покрытия. *Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов*. 2023;189-192.

24. Tolstoy A., Gridchin A., Glagolev E., Lesovik R., Shapovalov N. Efficient Construction Composites for Construction in the North and the Arctic. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;147:15–22. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1_3

25. Lim G.Q.V., Chong W.C., Chong K.C. Self-healing Materials: Unlocking New Potential in Membrane Technology. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*. 2024;28:1-8. https://doi.org/10.11113/jamst.v28n3.299

26. Veeramani N., Kumar D. R., Manikandanath N. T., Ganesh A. S., John S., Srinivas G. Investigation of microcapsules based self-healing composites embedded with carbon nanotubes for improved healing efficiency. *Journal of Polymer Research*. 2024;31:312. https://doi.org/10.1007/s10965-024-04155-5

27. Chen S., Liu X., Miao Y., Ge S., Li S., Liu L., Hou L., Rezakazemi, M., Aminabhavi T. M., Fan W. Self-healing polyurethane/cellulose nanocrystal composite fibers with fatigue and aging resistance for smart wearable elastic yarns. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2024;8:8. https://doi.org/10.1007/s42114-024-01089-w

28. Sun N., Liu X., Lv W., Xu C., Zhang A., Sun P. Composite Hydrogels with Rapid Self-Healing, Stretchable, Moldable and Antibacterial Properties Based on PVA/ε-Poly-L-lysine/Hyaluronic Acid. *Molecules*. 2024;29:4666. https://doi.org/10.3390/molecules29194666

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черкашина Наталья Игоревна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник-руководитель научно-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, natalipv13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0161-3266

Павленко Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретической и прикладной химии», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, belpavlenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3464-1880

Ручий Артём Юрьевич – инженер-исследователь НИЛ кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, artiem.ruchii.99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-2617-5624

Серебряков Сергей Викторович – младший научный сотрудник НИЛ кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, serebr43@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0008-0284-6647

Баринов Роман Алексеевич – студент кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, barinovroman216@gmail.com, https://orcid.org/0009-0007-8810-8858

ВКЛАД АВТОРОВ

Черкашина Н.И. – научное руководство; постановка целей и задач исследования; анализ результатов исследования; доработка текста статьи.

Павленко В.И. – разработка методологии исследования; анализ результатов исследования; выводы статьи.

Ручий А.Ю. – проведение экспериментальной части исследования; анализ результатов исследований; написание первоначального текста статьи.

Серебряков С.В. – проведение экспериментальной части исследования; графическое и табличное представление результатов.

Баринов Р.А. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 07.03.2025; одобрена после рецензирования 06.04.2025; принята к публикации 09.04.2025.

SYSTEM SOLUTIONS TO TECHNOLOGICAL PROBLEMS

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-201-209

CC BY 4.0

Development of armored products made from multilayer composite plates

Lyubov A. Bokhoeva[1], Vitaly E. Rogov[2], Elena B. Bochektueva[1], Aldar B. Baldanov[1]*, Roman P. Ivanov[1]

[1] East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia
[2] Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

* Corresponding author: e-mail: aldarbaldanov@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Modern requirements for personal and local armor protection dictate the creation of lightweight, durable, and efficient materials that can withstand a variety of threats, including shrapnel and low-velocity bullets. Conventional metal armor panels, while reliable, have a significant weight that limits their use. At the same time, ceramic materials, although they provide a high level of protection, are prone to the formation of secondary fragments upon impact. In this regard, composite materials such as aramid fibers and ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE), which combine low weight with high strength and resistance to dynamic loads, are of particular interest. The article discusses the development of multilayer plates made from composite materials for personal and light armor protection. **Methods and materials.** Multilayer structures, including UHMWPE and aramid fabrics, were used to create armor plates. These structures were impregnated with epoxy resin and bioadditives such as collagen. The paper proposes a technology for the production of multilayer plates using aramid fabric and bioadditives. The technological process consisted of several steps: 1) a comprehensive study of the selected polymer materials with experimental determination of rigidity and strength characteristics; 2) cutting the fabric using a laser machine; 3) manufacturing an armor plate depending on the material and the loads subjected to it. Composite plates made from UHMWPE were created through hot molding using a press mold, and they consist of varying numbers of material layers. Multilayer elements (up to 30 layers) were made from aramid fabric with epoxy resin with bioadditives, which impart new elastoplastic properties to the material. **Results.** The ANSYS software package was used to calculate the strength of a multilayer composite plate under shock loading; field testing of the obtained plates as armor protection were also conducted, demonstrating good agreement with the calculations. Discussion. The obtained combined armor plates are highly effective in absorbing kinetic energy and preventing fragment penetration. Adding bioadditives to the epoxy matrix increased the interlayer defect zone, which contributed to the dissipation of impact energy. According to the authors, when adding bioadditives, the material acquires high fracture toughness. **Conclusion (Findings).** The developed armor plates offer a combination of low weight, no ricochets, and minimal deformation behind the barrier. This makes them promising for use in personal and local protective equipment. The use of bioadditives has improved the mechanical properties of the composite materials, and the test results confirm that the products comply with the Br3 protection grade, with a weight reduction of 25–30% compared to the analogues. The resulting products (low weight, absence of ricochet and traumatic consequences after impact) make them suitable for use as protection against shrapnel and pistol bullets.

KEYWORDS: plate, composite materials, technology, bioadditives, interlayer defects, lightweight armor, mold

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was carried out within the framework of the RB grant No. 505 for the implementation of the strategic academic leadership program "Priority-2030"; within the framework of the state assignment of the Baikal Institute of Nature Management SB RAS No. 0273-2021-0007.

FOR CITATION:
Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Bochektueva E.B., Baldanov A.B., Ivanov R.P. Development of armored products made from multilayer composite plates. *Nanotechnology in Construction*. 2025;17(2):201–209. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-201-209. – EDN: XEBLGZ.

© Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Bochektueva E.B., Baldanov A.B., Ivanov R.P., 2025

SYSTEM SOLUTIONS TO TECHNOLOGICAL PROBLEMS

Разработка бронированных изделий из многослойных композиционных пластин

Любовь Александровна Бохоева[1], Виталий Евдокимович Рогов[2], Елена Баторовна Бочектуева[1], Алдар Батомункуевич Балданов[1]*, Роман Петрович Иванов[1]

[1] Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия
[2] Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: aldarbaldanov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные требования к средствам индивидуальной и локальной бронезащиты диктуют необходимость создания легких, прочных и эффективных материалов, способных противостоять разнообразным угрозам, включая осколки и низкоэнергетические ударные нагрузки. Традиционные металлические бронепанели, несмотря на свою надежность, обладают значительным весом, что ограничивает их применение. В то же время керамические материалы, хотя и обеспечивают высокий уровень защиты, склонны к образованию вторичных осколков при ударе. В этой связи особый интерес представляют композиционные материалы, такие как арамидные волокна и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), которые сочетают малый вес с высокой прочностью и устойчивостью к динамическим нагрузкам. В работе представлена разработка многослойных пластин из композиционных материалов, применяемых для средств индивидуальной и локальной легкой защиты. **Методы и материалы.** Для изготовления бронепластин использовались многослойные структуры, включающие СВМПЭ и арамидные ткани, пропитанные эпоксидной смолой с биодобавками (коллаген). В работе предложено изготовление многослойных пластин из арамидных тканей с применением биодобавок. Процесс состоит из нескольких этапов: 1) комплексное исследование выбранных полимерных материалов с экспериментальным определением жесткостных и прочностных характеристик; 2) раскрой ткани с использованием лазерного станка; 3) изготовление бронепластины в зависимости от материала и подвергаемых нагрузок. Композитные пластины из СВМПЭ получены методом горячего формования под пресс-формой и состоят из разного количества слоев материала. Многослойные элементы (до 30 слоев) изготавливали из арамидной ткани с эпоксидной смолой с биодобавками, которые придают материалу новые упругопластичные свойства. **Результаты.** В программном комплексе ANSYS сделан расчет на прочность многослойной композиционной пластины от действия ударной нагрузки; также проведены испытания полученных пластин в качестве бронезащиты, демонстрирующие хорошую сходимость с расчетами. **Обсуждение.** Полученные комбинированные бронепластины обладают высокой эффективностью в поглощении кинетической энергии и предотвращении проникновения осколков. Добавление биодобавок в эпоксидную матрицу увеличило зону межслойного дефекта, что способствовало диссипации энергии удара. По мнению авторов, при добавлении биодобавок материал приобретает высокую вязкость разрушения. **Заключение (Выводы).** Разработанные бронепластины сочетают малый вес, отсутствие рикошета и минимальные запреградные деформации, что делает их перспективными для использования в средствах индивидуальной и локальной защиты. Применение биодобавок улучшило механические свойства композитов, а результаты испытаний подтвердили соответствие изделий при снижении массы на 25–30% по сравнению с аналогами. Полученные изделия (небольшой вес, отсутствие рикошета и травматических последствий после удара) обеспечивают возможность использования их в качестве защиты от осколков и ударных нагрузок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пластина, композиционные материалы, технология, биодобавки, межслойные дефекты, легкая броня, пресс-форма

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках средств гранта РБ №505 на реализацию программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»; в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН № 0273-2021-0007.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Бочектуева Е.Б., Балданов А.Б., Иванов Р.П. Разработка бронированных изделий из многослойных композиционных пластин. *Нанотехнологии в строительстве.* 2025;17(2):201–209. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-201-209. – EDN: XEBLGZ.

INTRODUCTION

Currently, the development of lightweight and ultra-strong armor products with improved properties and parameters compared to existing analogues is of great importance. According to world military statistics, 30% of bullet wounds account for 70% of shrapnel injuries among personnel. Therefore, an important role in protecting against shrapnel and low-velocity weapon impacts (pistol bullets) is played by armor. Armor ab-

sorbs the energy of the impact and prevents shrapnel from penetrating the body. Lightweight armor is used in personal armor protection (bullet-proof vests, armor shields, armored helmets, shoes), as well as for local protection of vehicles and helicopters [1–4]. Polymer armor made from non-impregnated polymer binder fabrics with a specific weave of fibers is used to protect helicopter structures against high-speed impacts.. For many years, metal armor has been used in passenger vehicles, made from special armored steels. However, this type of armor can increase the weight of the car to its maximum. The authors believe that composite armor is the most effective way to protect vehicles. Composite armor has several advantages over other protective structures, such as lower weight and increased comfort for the driver and passengers.

The thickness of woven armor packages produced by different manufacturers varies from 6–7 mm for the first protection class to 18–20 mm for the second protection class. These protective structures may include shock absorbers designed to reduce the risk of human injury.

To withstand multiple high-speed, high-energy impacts of varying intensity and flying fragments, armor plates made from various materials are used. These include special metal alloys, which are used to create metal armor panels. Additionally, ultra-high molecular weight polyethylene and ceramic materials made from various metal oxide powders are also used [7–16].

Advantages of metal armor panels include: low cost, small thickness, high survivability, and operational durability. Their main disadvantage is high ricochet ability and weight. Ceramic panels have a high protection class and a relatively low weight, but they form multiple damaging fragments upon impact. The lightest available armor option is composite plates made from UHMWPE, which have low weight and no ricochet, but may cause significant deformations behind the armor and injure a person.

The disadvantages of the presented materials do not always allow creating the necessary anti-fragmentation protection; therefore, armor plates are produced as a combination of several different materials (sandwich package). Practice has shown that the first component of the protection takes on a high-speed impact and ensures maximum energy extraction of the striker. The rear elements of the armor plate must be sufficiently rigid and not subject to large deformations.

Optimum performance characteristics of armor can be achieved by using the potential of existing types of composites, as well as by combining properties that correspond to the maximum capabilities for minimum weight and strength of a particular composite material or structures made from this material.

This article discusses the development of multilayer plates made from composite materials that are used for personal and local lightweight armor protection.

SELECTING MATERIAL FOR LIGHTWEIGHT ARMOR PROTECTION

Fabrics based on aramid and UHMWPE fibers have been considered as promising materials for armored products.

Aramid fibers, made from polyparaphenylene terephthalamide, are an extremely strong material that has five times the strength of steel. At the same time, they are relatively lightweight, with a density of only 1.44 grams per cubic centimeter.

UHMWPE exhibits unique mechanical properties, has high wear resistance, impact resistance, abrasion and abrasive wear, surpassing other polymers and many steel grades in these qualities (density is 0.95 g/cm^3). It is known [7, 17] that UHMWPE fibers have a specific fibrillar structure, which is formed by fibrillar proteins. Fibrillous proteins give tissues and structures rigidity, strength, elasticity. Some of the main structural proteins – animal connective tissues include collagen and elastin, as well as keratins in hair and horn formations and fibroin in natural silk, etc. Fibrils in UHMWPE fibers have a “shish-kebab” structure that is 50–70 nanometers long. This “shish-kebab” – like structure is a unique structure to polymers that resembles disks or plates strung on a common rod. The ability of polymer fibers with this fibrillar structure to resist high-speed impacts is ensured by a complex mechanism that inhibits crack growth:

- The splitting off microfibrils from the surface of the fibers during deformation and the accumulation of defects create barriers in the path of cracks;
- The rounding off of the crack tip due to multiple stages of relaxation processes and the forced damping of vibrations;
- Low sensitivity of fibers to stress concentrators.

PLATE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

A technology for manufacturing multilayer plates used for personal and local lightweight armor protection has been developed [3, 18–22]. At the first step, a comprehensive study of the selected polymeric materials was conducted. The mechanical properties of the individual layers of selected materials were obtained in order to calculate the strength of the multilayer plate. The samples used were strips of UHMWPE films, Kevlar fabric, and aramid fabric.

Tensile testing of 150×20 mm samples was conducted in accordance with GOST 11262 using an INSTRON 3368 testing machine (Figure 1), with a gripping speed of 10 mm/min. Figures 2 and 3 show the graphs of the dependence of the load on deformation during sample stretching; the values of the material stiffness properties were obtained: for one, two, and three layers.

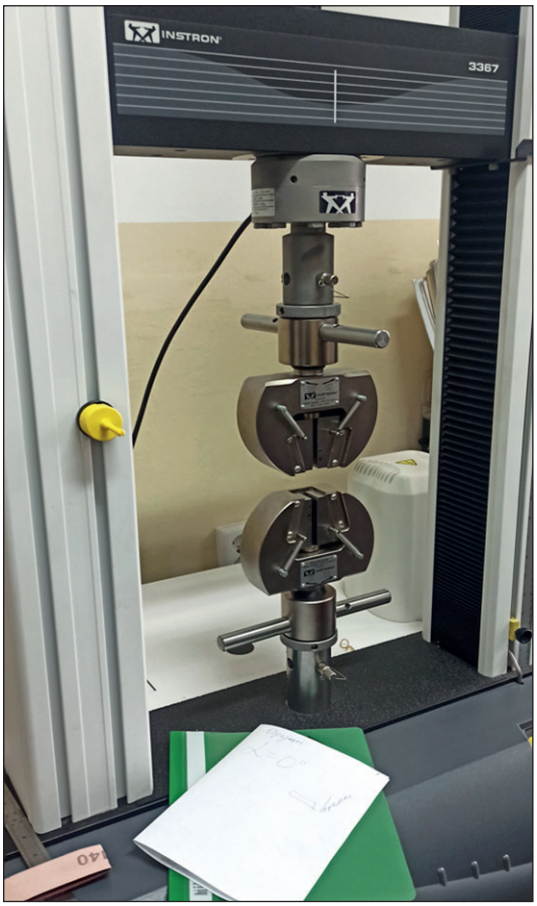


Fig. 1. Electromechanical tensile testing machine INSTRON 3368

Cutting of the material fabric is the second step in the process of manufacturing armor plates. The fabric for the plates is cut into pieces of a specific size using a stencil. It is important to avoid the formation of folds and overlaps when laying the fabric in the mold.

The fabric was cut using a Kamach laser cutting machine, where geometric parameters of the plate were set. During the cutting process of aramid fabric or oriented polyethylene, some issues arise that are common to most fabrics and specific to aramid fibers. If the fabric is not symmetrical, the bending of the warp and weft threads is different, these differences must be taken into consideration when cutting. Additionally, the direction of warp orientation must also be considered when laying out layers of fabric.

The third step of the process is the production of an armor plate. This plate consists of two main components: a multilayer material made from UHMWPE and aramid fabric package impregnated with epoxy resin containing bioadditives. The initial components of the armor plates take on a high-speed impact and ensure maximum extraction of the kinetic energy of the impactor and break through the "crushing" mechanism. Such elements require fabric with a structure that effectively converts the local impact of the striker into a deformation cone distributed over the volume. UHMWPE-made fabrics have such a structure. The first elements of the composite plates are created through hot molding process and consist of a varying numbers of layers of UHMWPE material with a thickness of 0.3 mm (up to 100 layers).

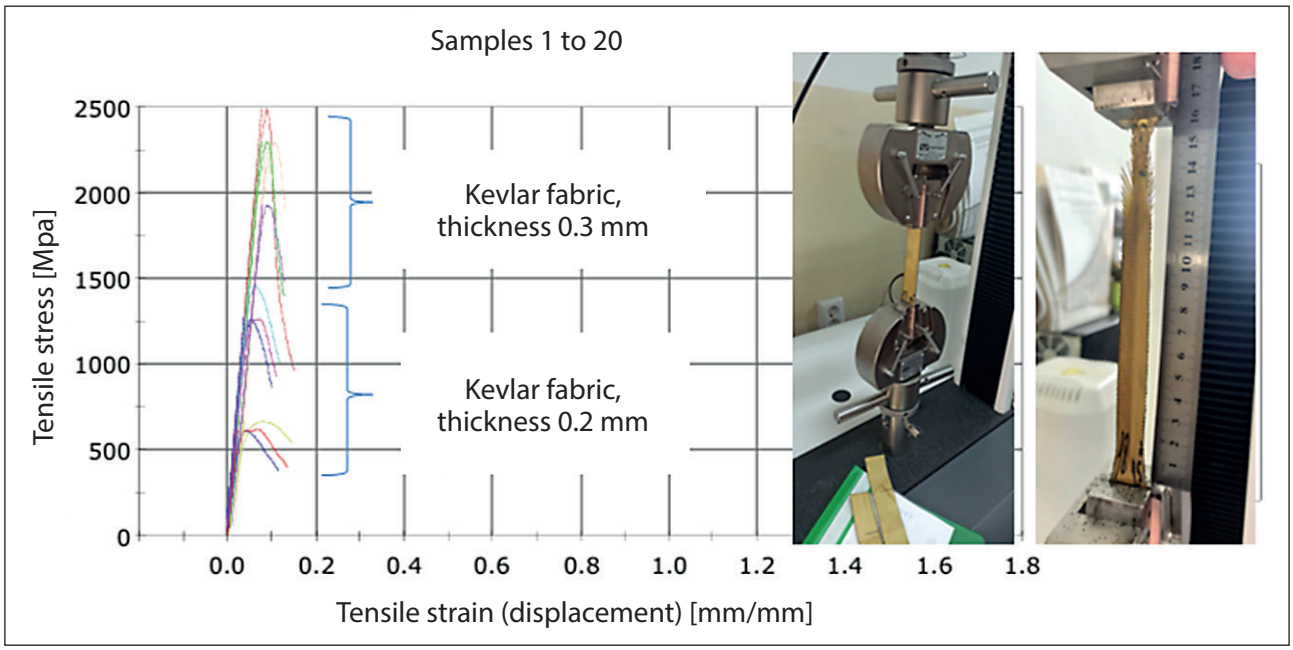


Fig. 2. Graphs of the dependence of the load on the deformation during the stretching of samples made from aramid fabrics and Kevlar fabrics

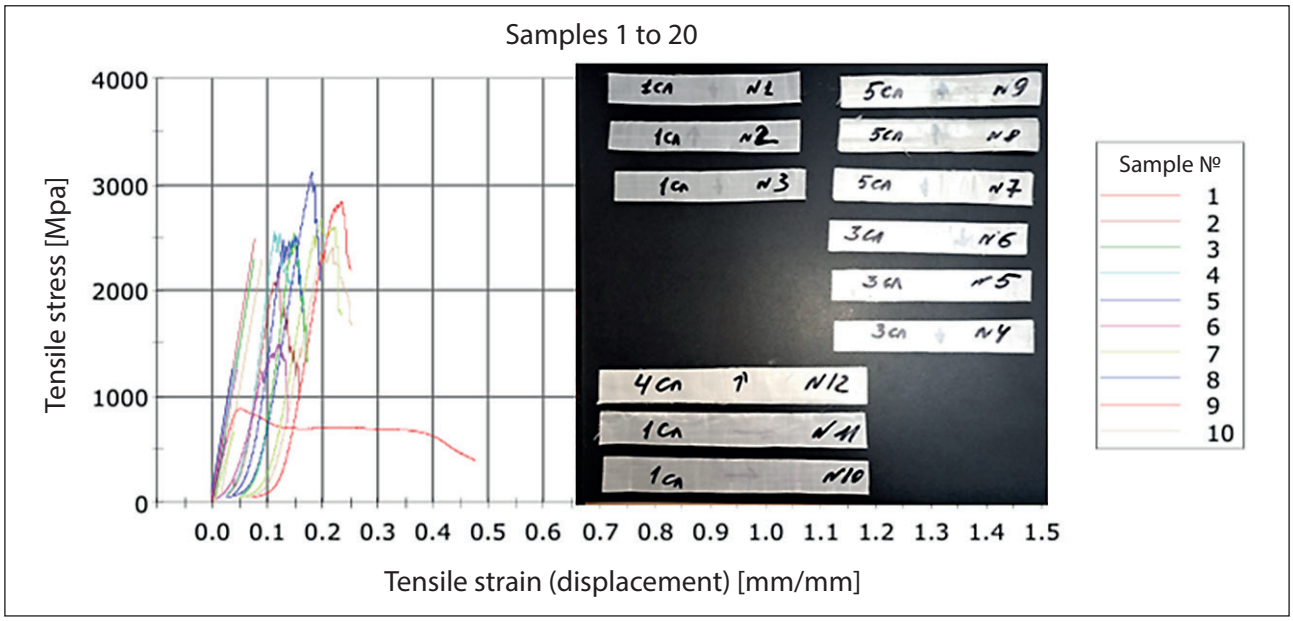


Fig. 3. Graphs of the dependence of load on deformation during the stretching of UHMWPE samples

The layers are a film of a set of aligned filaments connected to each other. To produce UHMWPE plate elements, we developed a heated high-pressure mold made of aluminum and steel, which was modeled and manufactured (see Figure 4). Using 3D modeling software products NX10 and ANSYS, we modeled a high-pressure mold for working with polymer materials. Hot forming at temperatures up to 150 °C allows us to obtain high-quality blanks that accurately reproduce the desired shape. The finished products are cooled with the mold. The entire process takes between 10 and 24 hours to complete, depending on the temperature and thickness of the multilayer elements being produced.

The rear multilayer armor plates should not undergo significant deformation, which helps minimize human injuries. Therefore, they are made from dense aramid fabrics. The multilayer elements, which can be up to 30 layers thick, were made from aramid fabric combined with epoxy resin (ED-20 GOST 10587-84) with bioadditives. As a bioadditive, we used a bioactive material – collagen (dried or in the form of a gel), obtained in VSGUTU from animal skin waste. The bioactive material has a sour-milk composition or lactic acid and belongs to fibrillar proteins. Therefore, the bioadditives introduced into the brittle epoxy resin impart new elastic-plastic properties to the material [17, 23–24]. When

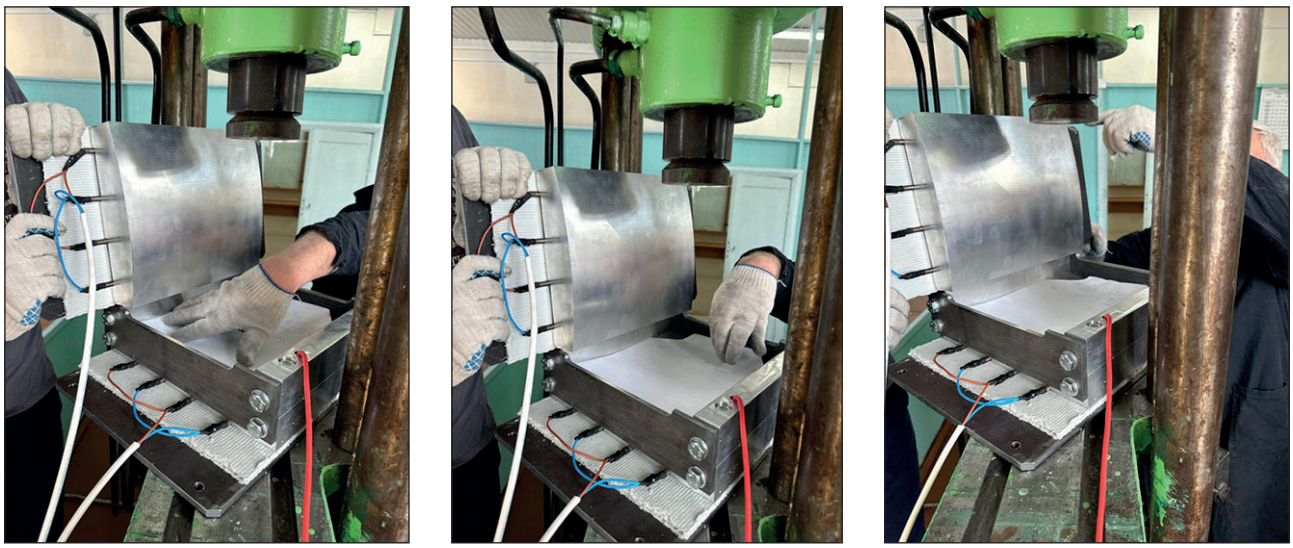


Fig. 4. The process of installing and configuring the high-pressure mold

using bioadditives, both empirically and theoretically, we encounter the problem of uncertainty in the distribution of particles by volume in the matrix. A method for introducing bioadditives with varying mass concentrations (between 5–15% by weight) has been developed and a new approach for their evenly distribution in the polymer matrix of the composite has been proposed [25]. The introduction of bioadditives into the matrix of the polymer composite material allows changing the physical and mechanical properties. However, there is a problem with their evenly distribution on the surface of the epoxy resin. There are several main methods for incorporating bioadditives into composite materials. One of these methods is by mixing the bioadditives with epoxy resin using a mixing machine that rotates the platform and the container. For better processing, zirconium oxide (ZnO_2) balls can be added to the suspension with ED-20 epoxy resin with bioadditives, the total mass is equal to the mass of the mixture. As a result of rotation in the container, the balls create shear forces that promote the destruction of agglomerates and evenly distribution of bioadditives in the epoxy resin.

It can also be used an AG SONIC TC-150B ultrasonic bath with water heated to 45 °C for evenly distribution of bioadditives in the epoxy resin. An ultrasonic bath reduces the occurrence of air bubbles formed during mechanical mixing and promotes evenly distribution of particles. In this research for evenly distribution of bioadditives in the epoxy resin, authors used an AG SONIC TC-150B ultrasonic bath with water heated to 45 °C. According to the authors, kinetic energy dissipation during a low-velocity impact in multilayer composite structures is observed due to an increase in the interlayer defect zone. Studies of defects in the plate after testing have shown that the area of interlayer destruction is significantly higher in modified layered composite materials with bioadditives [26]. It was found that after testing for impact load, the impactor velocity decreased by 30–45%, while the interlayer defect zone increased, the material had high fracture toughness. The analysis of plate damage was made in the ANSYS software package. In the ANSYS/LS-DYNA finite element system, with additional modules, we have developed dynamic models of the destruction of multilayer plates and the appearance of defects or holes due to a high-speed impact from a striker. 3D models of the striker and multilayer plate have been created, which correspond to the experimental samples.

Models of plates up to 100 layers made from UHMWPE and up to 30 layers made from aramid fabrics have been built. The calculation of each computer experiment takes from 6 to 8 hours. In the modeling, we used the mechanical properties of the composite materials, which were determined using both calculated analytical formulas and experimental methods [20, 24, 26]. The samples were subjected to impact tests at an impact speed of 380–500 m/sec. Fig. 5 shows the damage area to a plate made from aramid fabric with the addition of bioadditives to the epoxy matrix up to 10%. Fig. 6 shows the damage area to a plate made from aramid fabric with the addition of bioadditives to the epoxy matrix up to 1%. The strength calculation of the multilayer composite plate under the action of an impact load has been performed.

The following damage areas have been identified: 1 – no damage (blue indicator); 2 – interlayer defects (yellow, green indicator); 0 – complete destruction (red indicator). Fig. 5 shows the area of damage to the plate (interlayer defects) – 32% of the total area of the plate. Fig. 6 presents the damage area of the plates – 18%. Each layer reduces the impact, while an increase in the interlayer defect zone is observed, which corresponds to the results of experimental studies.

The back multilayer elements of the plate were obtained by molding in a low-pressure mold. To manufac-

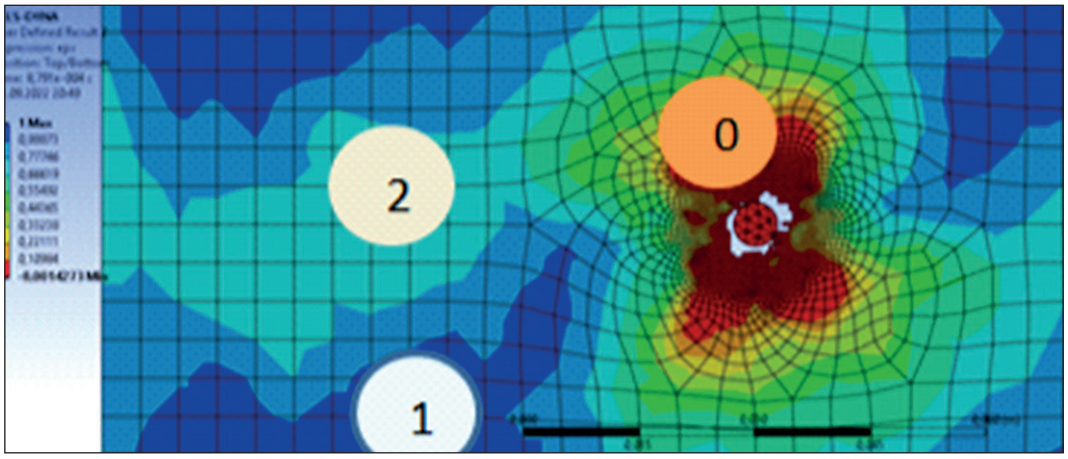


Fig. 5. Damage area of a plate made from aramid fabric with the addition of bioadditives to the epoxy matrix up to 10%

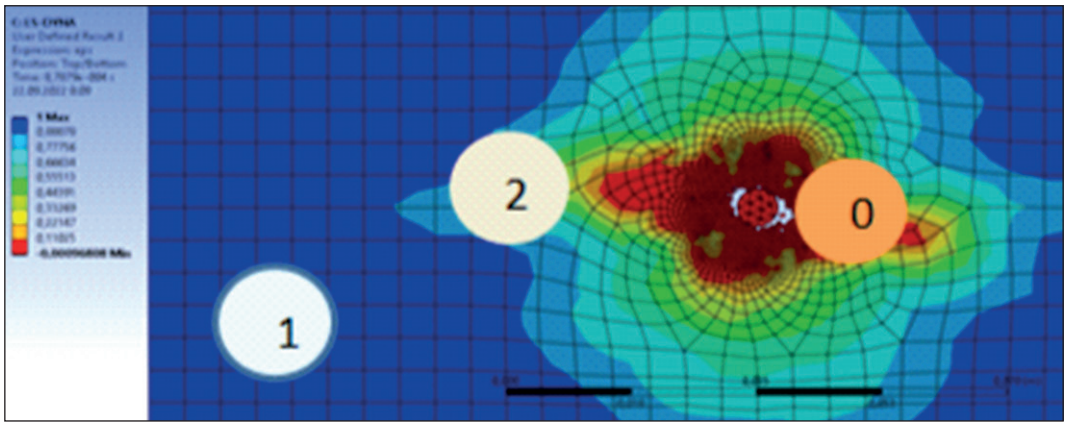


Fig. 6. Damage area of a plate made from aramid fabric with the addition of bioadditives to the epoxy matrix up to 1%

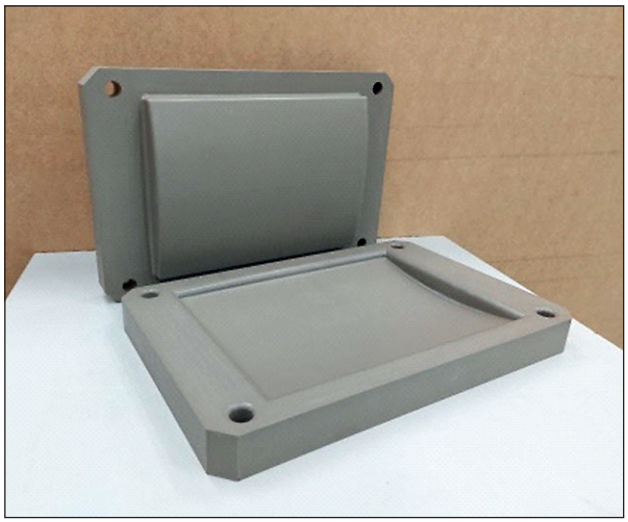


Fig. 7. Low pressure mold made from polymeric materials

ture the plate elements from aramid fabrics, a low-pressure mold made of unreinforced polymers was designed, modeled and manufactured. A low-pressure mold made from polymer materials was developed and modeled using 3D modeling software products in NX10 and ANSYS (Figure 7).

When molding in a press, the cut prepreg (aramid material and uncured resin with bioadditives) is placed in a mold (matrix), clamped with the mold's counterpart (punch), and an external pressure of 15 tons is applied so that the product acquires the required shape. The pressure is maintained until the resin has hardened. The manufacturing process for one multilayer element can take up to 24 hours.

At the final stage of armor plate production, multilayer plates are bonded and sheathed. The resulting armor plate and elements are weighed, their thickness and dimensions measured, and recorded in the armor plate production protocol. Armor plates with a protection class of Br3 weigh 1300 ± 5% grams, which is 25–30% less than existing counterparts.

TESTING THE LIGHTWEIGHT ARMOR PROTECTION

The development of a composite material for lightweight armor is guided mainly by the results of experimental testing, due to the complex nature of the processes that occur at dynamic loading rates [27, 28]. Field tests were conducted using an impactor with a speed ranging from 390 to 410 meters per second. The test temperature was up to ±40 degrees Celsius, and the humidity was up to 100 percent. All test results were recorded in the test protocol.

CONCLUSION

The main advantage of the new armor plates is their lightweight design, which eliminates the risk of ricochets and recoil on the wearer's chest, thereby reducing the likelihood of traumatic injuries after impact. Additionally, these plates do not produce any fragments. A technology for manufacturing multilayer plates from aramid fibers with bioadditives has been developed. Field testing of the obtained plates as armor protection has been conducted. The obtained products provide the possibility of using them as protection against fragments and pistol bullets. The results of these tests have shown that the plates are able to withstand both shrapnel and pistol bullets.

REFERENCES

1. *Light ballistic materials* / edited by A. Bhatnagar. Moscow: Tekhnosfera; 2006. (in Russ.)
2. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materials and structures of light armor protection*. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University; 2014. EDN: ZCKSNL (in Russ.)
3. Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Chermoshentseva A.S., Perevalov A.V. *Modeling and manufacturing technology of aircraft structures from composite materials. Bulletin of VSGUTU*. 2013;2(41):12–18. (in Russ.)
4. Tkachenko N.A. Development of a soft armor package corresponding to protection classes BR1, C and C2 (at least 550 M/C) GOST 34286-2017. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022;3:621–634. (in Russ.)
5. Popelkhov D.M., Groshevoy S.N. Armoring of automobile equipment. In: *Collection of conference materials of the III Interuniversity Scientific and Technical Conference with international participation dedicated to the 105th anniversary of the birth of Ivan Kirillovich Yakovlev*. Novosibirsk. 2023: 82–89. EDN: TABVKU (in Russ.)
6. Silnikov N. M., Puchkov A. S., Pechenik R. A. Development of an additional armor kit for the Ural-4320 vehicle. *Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*. 2023; 3 (128): 92–97. https://doi.org/10.53816/2075-3608-2023-3-92 EDN: TUXHDJ (in Russ.)
7. Mikhailin Yu. A. *Special polymer composite materials*. Saint Petersburg: Scientific principles and technologies (NOT); 2009. EDN: RBBLMR (in Russ.)
8. Beklemysheva K. A., Petrov I. B. Modeling of destruction of hybrid composites under the action of low-speed impact. *Mathematical modeling*. 2018; 30(11):27–43. EDN: VMLDMT (in Russ.)
9. Rogov V.E., Bokhoeva L.A., Chermoshentseva A.S. *Method for producing laminated plastic*. Russian Federation Patent 2715188. Applicant and patent holder: Baikal Scientific Center of Strength LLC. IPC B32B27/18, B82Y30/00 published 02/25/2020. Bulletin 6. (in Russ.)
10. Tikhonov I.N., Kryuchkov V.G., Zvezdov A.I., Sokolov B.S., Tikhonov G.I. *Multilayer armor protection*. Russian Federation Patent 2781964. Application No. 2022108864 dated 04.04.2022. EDN: TCSCNY (in Russ.)
11. Samoilov D.A., Farukh M.A. *Individual armor protection*. Russian Federation Patent 2818875. Application dated 06.02.2023. (in Russ.)
12. Novikov V.A. Bulletproof vests: modern materials and their properties. *In: Int. scientific-technical. conf. of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod*. 2015:1443–1446. EDN: USQKHD (in Russ.)
13. Gladyshev S.A. Grigoryan V.A. *Armor steels.* Moscow: Intermet Engineering; 2010. (in Russ.)
14. Morozova T.V., Dvortsevaya A.M., Kupriyanova E.V., Osipchik V.S. Study of promising aramid fibers Rusar-S in personal body armor. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. Vol. XXXIII. 2019;(6):65-67. EDN: YNWOSC (in Russ.)
15. Mylnikova V.V., Abrosimova A.A., Romanova I.D., Romanova A.D. Analysis of materials and their properties used for personal body armor. *Advances in modern natural science.* 2014;(9–2):143–147. EDN: SOBXFD (in Russ.)
16. Kulakov N.A., Lyubin A.N. Design features of composite armor with increased survivability. *Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI"*. 2011;1(11): 46–51. EDN: NEGJZH (in Russ.)
17. Baldanov A.B., Bokhoeva L.A., Shalbuev D.V., Tumurova T.B. Collagen-based bioadditives in polymer composite materials. *Nanotechnology in Construction*. 2022;14(2):137–144. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-137-144 EDN: PZKGOD (in Russ.)
18. Grigoryan V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M., Chistyakov E. *Materials and protective structures for local and individual booking*. Moscow: RadioSoft Publishing House; 2008. (in Russ.)
19. Bokhoeva L.A., Pnev A.G., Damdinov T.A. Modeling and manufacturing technology of helicopter blades from composite materials. *Systems. Methods. Technologies*. 2011;2(10):16–20. EDN: OKCBRF (in Russ.)
20. Bokhoeva L.A., Perevalov A.V., Chermoshentseva A.S., Kurokhtin V.Yu., Lygdenov B.D., Rogov V.E. Experimental determination of fatigue resistance characteristics of aviation equipment. *Bulletin of VSGUTU*. 2013;5(44):46–53. EDN: REQXQN (in Russ.)
21. Bokhoeva L.A., Perevalov A.V., Chermoshentseva A.S., Ergonov V.P., Rogov V.E. Development of stands for resource testing of products of aviation and other equipment. *Bulletin of VSGUTU*. 2013;6(45):31–35. EDN: RRYRTZ (in Russ.)
22. Kryukov D.B. Aspects of obtaining lightweight armor composite materials with a mechanism for localizing brittle cracks in the structure under ballistic impact. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series "Materials. Designs. Technologies"*. 2023;1(25):20–28. https://doi.org/10.25686/2542-114X.2023.1.20 EDN: KNOFLA (in Russ.)
23. Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S., Amin T. Effect of adding nanopowders on the strength of multilayer composite materials. *Factory laboratory. Diagnostics of materials.* 2021;87(8):42–50. https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-8-42-50 EDN: EOQGON (in Russ.)

24. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Bochektueva E.B., Baldanov A.B., Shatov M.S., Batuev Ts.A. Application of nanoscale components in multilayer composite materials. *Nanotechnology in Construction*. 2024;16(2):180–188. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-180-188 EDN: OIXLJE (in Russ.)

25. Baldanov A. B., Bazarova V. D., Ivanov R. P., Tsydenova A. Zh. Study of nanopowder distribution by electrostatic spraying in composite material. *In: VIII International Conference on Problems of Mechanics of Modern Machines. Conference Papers*. Ulan-Ude; 2022: 119–122. https://doi.org/10.53980/9785907599055_119 EDN: BDCKAU (in Russ.)

26. Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Rogov V.E. Features of interlayer fracture under impact loading of composite materials with a variable layer stacking angle. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2024;2:50–60. https://doi.org/10.17804/2410-9908.2024.2.050-060 EDN: WGXTSX (in Russ.)

27. Bokhoeva L.A., Pnev A.G., Filippova K.A. Development of an algorithm for automatic processing of experimental results of samples made of composite materials with defects. *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N.* Tupolev. 2010;4:10–16. EDN: PAODCP (in Russ.)

28. Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Perevalov A.V., Bochektueva E.B., Rogov V.E., Ivanov Yu.N., Bobarika I.O. Impact testing of multilayer composite samples. *In: VIII International Conference on Problems of Mechanics of Modern Machines. Conference proceedings*. Ulan-Ude, 2022;412–416. https://doi.org/10.53980/9785907599055_412 EDN: OSNRAK (in Russ.)

ADDITIONAL INFORMATION

The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyubov A. Bokhoeva – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Information Technologies and Applied Mechanics, Faculty of Civil Engineering, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia, bohoeva@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6986-4307

Vitaly E. Rogov – Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia, rogov54v@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2249-0827

Elena B. Bochektueva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Information Technologies and Applied Mechanics, Faculty of Civil Engineering, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia, bochektueva.e@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5595-5670

Aldar B. Baldanov – Senior Lecturer, Department of Information Technology and Applied Mechanics, Faculty of Civil Engineering, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia, aldarbaldanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7655-215X

Roman P. Ivanov – Master's student, Department of Information Technologies and Applied Mechanics, Faculty of Civil Engineering, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia, iv-roman01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9248-037X

AUTHORS CONTRIBUTION

Bokhoeva L.A. – scientific supervision; analysis of research results; writing the article; drawing up final conclusions.

Rogov V.E. – development of the concept and methodology of the study.

Bochektueva E.B. – literature review; theoretical analysis.

Baldanov A.B. – conducting numerical calculations.

Ivanov R.P. – conducting experimental work.

The authors declare no conflict of interest.

The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 07.04.2025; accepted for publication 10.04.2025.

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Научная статья / Original article
УДК 620.1
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-201-209

CC BY 4.0

Разработка бронированных изделий из многослойных композиционных пластин

Любовь Александровна Бохоева[1], Виталий Евдокимович Рогов[2], Елена Баторовна Бочектуева[1], Алдар Батомункуевич Балданов[1]*, Роман Петрович Иванов[1]

[1] Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия
[2] Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: aldarbaldanov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные требования к средствам индивидуальной и локальной бронезащиты диктуют необходимость создания легких, прочных и эффективных материалов, способных противостоять разнообразным угрозам, включая осколки и низкоэнергетические ударные нагрузки. Традиционные металлические бронепанели, несмотря на свою надежность, обладают значительным весом, что ограничивает их применение. В то же время керамические материалы, хотя и обеспечивают высокий уровень защиты, склонны к образованию вторичных осколков при ударе. В этой связи особый интерес представляют композиционные материалы, такие как арамидные волокна и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), которые сочетают малый вес с высокой прочностью и устойчивостью к динамическим нагрузкам. В работе представлена разработка многослойных пластин из композиционных материалов, применяемых для средств индивидуальной и локальной легкой защиты. **Методы и материалы.** Для изготовления бронепластин использовались многослойные структуры, включающие СВМПЭ и арамидные ткани, пропитанные эпоксидной смолой с биодобавками (коллаген). В работе предложено изготовление многослойных пластин из арамидных тканей с применением биодобавок. Процесс состоит из нескольких этапов: 1) комплексное исследование выбранных полимерных материалов с экспериментальным определением жесткостных и прочностных характеристик; 2) раскрой ткани с использованием лазерного станка; 3) изготовление бронепластины в зависимости от материала и подвергаемых нагрузок. Композитные пластины из СВМПЭ получены методом горячего формования под пресс-формой и состоят из разного количества слоев материала. Многослойные элементы (до 30 слоев) изготавливали из арамидной ткани с эпоксидной смолой с биодобавками, которые придают материалу новые упругопластичные свойства. **Результаты.** В программном комплексе ANSYS сделан расчет на прочность многослойной композиционной пластины от действия ударной нагрузки; также проведены испытания полученных пластин в качестве бронезащиты, демонстрирующие хорошую сходимость с расчетами. **Обсуждение.** Полученные комбинированные бронепластины обладают высокой эффективностью в поглощении кинетической энергии и предотвращении проникновения осколков. Добавление биодобавок в эпоксидную матрицу увеличило зону межслойного дефекта, что способствовало диссипации энергии удара. По мнению авторов, при добавлении биодобавок материал приобретает высокую вязкость разрушения. **Заключение (Выводы).** Разработанные бронепластины сочетают малый вес, отсутствие рикошета и минимальные запреградные деформации, что делает их перспективными для использования в средствах индивидуальной и локальной защиты. Применение биодобавок улучшило механические свойства композитов, а результаты испытаний подтвердили соответствие изделий при снижении массы на 25–30% по сравнению с аналогами. Полученные изделия (небольшой вес, отсутствие рикошета и травматических последствий после удара) обеспечивают возможность использования их в качестве защиты от осколков и ударных нагрузок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пластина, композиционные материалы, технология, биодобавки, межслойные дефекты, легкая броня, пресс-форма

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках средств гранта РБ №505 на реализацию программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»; в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН № 0273-2021-0007.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Бочектуева Е.Б., Балданов А.Б., Иванов Р.П. Разработка бронированных изделий из многослойных композиционных пластин. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(2):201–209. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-201-209. – EDN: XEBLGZ.

© Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Бочектуева Е.Б., Балданов А.Б., Иванов Р.П., 2025

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Development of armored products made from multilayer composite plates

Lyubov A. Bokhoeva[1], Vitaly E. Rogov[2], Elena B. Bochektueva[1], Aldar B. Baldanov[1]*, Roman P. Ivanov[1]

[1] East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia
[2] Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

* Corresponding author: e-mail: aldarbaldanov@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Modern requirements for personal and local armor protection dictate the creation of lightweight, durable, and efficient materials that can withstand a variety of threats, including shrapnel and low-velocity bullets. Conventional metal armor panels, while reliable, have a significant weight that limits their use. At the same time, ceramic materials, although they provide a high level of protection, are prone to the formation of secondary fragments upon impact. In this regard, composite materials such as aramid fibers and ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE), which combine low weight with high strength and resistance to dynamic loads, are of particular interest. The article discusses the development of multilayer plates made from composite materials for personal and light armor protection. **Methods and materials.** Multilayer structures, including UHMWPE and aramid fabrics, were used to create armor plates. These structures were impregnated with epoxy resin and bioadditives such as collagen. The paper proposes a technology for the production of multilayer plates using aramid fabric and bioadditives. The technological process consisted of several steps: 1) a comprehensive study of the selected polymer materials with experimental determination of rigidity and strength characteristics; 2) cutting the fabric using a laser machine; 3) manufacturing an armor plate depending on the material and the loads subjected to it. Composite plates made from UHMWPE were created through hot molding using a press mold, and they consist of varying numbers of material layers. Multilayer elements (up to 30 layers) were made from aramid fabric with epoxy resin with bioadditives, which impart new elastoplastic properties to the material. **Results.** The ANSYS software package was used to calculate the strength of a multilayer composite plate under shock loading; field testing of the obtained plates as armor protection were also conducted, demonstrating good agreement with the calculations. Discussion. The obtained combined armor plates are highly effective in absorbing kinetic energy and preventing fragment penetration. Adding bioadditives to the epoxy matrix increased the interlayer defect zone, which contributed to the dissipation of impact energy. According to the authors, when adding bioadditives, the material acquires high fracture toughness. **Conclusion (Findings).** The developed armor plates offer a combination of low weight, no ricochets, and minimal deformation behind the barrier. This makes them promising for use in personal and local protective equipment. The use of bioadditives has improved the mechanical properties of the composite materials, and the test results confirm that the products comply with the Br3 protection grade, with a weight reduction of 25–30% compared to the analogues. The resulting products (low weight, absence of ricochet and traumatic consequences after impact) make them suitable for use as protection against shrapnel and pistol bullets.

KEYWORDS: plate, composite materials, technology, bioadditives, interlayer defects, lightweight armor, mold

ACKNOWLEDGEMENTS: The research was carried out within the framework of the RB grant No. 505 for the implementation of the strategic academic leadership program "Priority-2030"; within the framework of the state assignment of the Baikal Institute of Nature Management SB RAS No. 0273-2021-0007.

FOR CITATION:
Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Bochektueva E.B., Baldanov A.B., Ivanov R.P. Development of armored products made from multilayer composite plates. *Nanotechnology in Construction.* 2025;17(2):201–209. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-2-201-209. – EDN: XEBLGZ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время крайне важны разработки по созданию и изготовлению легких и сверхпрочных бронированных изделий со свойствами и параметрами, улучшенными по сравнению с имеющимися аналогами. Согласно мировой военной статистике, на 30% пулевых ранений личного состава приходится 70% осколочных ранений. Поэтому важную роль в защите от осколков и воздействия низкоэнергетических средств поражения играет броня, которая поглощает энергию удара и предотвращает проникновение осколков в тело. Легкая броня применяется в средствах индивидуальной бронезащиты (бронежилетах, бронещитах, бронешлемах, обуви), а также для локальной защиты автомобилей, вертолетов [1–4]. Полимерная броня из непропитанных полимерными связующими тканями с определенным плетением волокон применяется в качестве защиты от высокоскоростных ударных нагрузок конструкций вертоле-

тов. На протяжении многих лет для бронирования легковых автомобилей использовали металлическую броню из специальных броневых сталей [5–6], однако такая броня предельно увеличивает массу автомобилей. Наиболее эффективна защита транспортных средств, по мнению авторов, композитной броней. К преимуществам композитной брони, при сравнении ее с другими защитными структурами защиты, следует отнести меньший вес и больший комфорт при эксплуатации изделия. Толщина тканых бронепакетов разных фирм-производителей колеблется от 6–7 мм для 1-го класса защиты, до 18–20 мм – для 2-го класса защиты. В составе защитных структур могут применяться демпферы различных конструкций для уменьшения травмирования человека.

Для многократного удержания скоростного высокоэнергетического удара различной интенсивности и летящих осколков используют бронированные пластины из различных материалов: специальных металлических сплавов - металлические бронепанели; сверхвысокомолекулярного полиэтилена – композитные; из различных порошков оксидов металлов – керамические [7–16]. Преимущества металлических бронепанелей: низкая стоимость; малая толщина; высокая живучесть и эксплуатационная стойкость. Основной недостаток металлических бронепанелей - высокая рикошетирующая способность и большой вес. Недостатком керамических панелей является образование множественных поражающих осколков при ударе, при этом они реализуют высокий класс защиты при сравнительно низком весе. Самый легкий из доступных вариантов бронепанелей – это композитные пластины из СВМПЭ. Преимущества композитных СВМПЭ бронепанелей: малый вес; отсутствие рикошета. Основной недостаток – значительные заброневые деформации пластин, травмирующие человека.

Недостатки представленных материалов не всегда позволяют создать необходимую противоосколочную защиту, поэтому бронепластины выполняют в виде комбинации из нескольких различных материалов (сэндвич-пакет). Практикой установлено, что первый составной элемент защиты принимает на себя высокоскоростной удар и обеспечивает максимальный отбор энергии ударника. Тыльные элементы бронепластины должны быть достаточно жесткими и не подвергаться большим деформациям.

Оптимальные эксплуатационные характеристики брони можно получить при условии использования потенциала из существующих типов композитов, а также сочетанием свойств, которые соответствуют предельным возможностям по минимальному весу и прочности того или иного композитного материала или выполненных из этого материала структур.

В данной работе представлена разработка многослойных пластин из композиционных материалов, применяемых для средств индивидуальной и локальной легкой бронезащиты.

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЛЕГКОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ

В качестве перспективных материалов для бронированных изделий рассматривались ткани на основе арамидных и СВМПЭ волокон.

Арамидные волокна, полученные из полипарафенилен-терефталамида, являются сверхпрочным материалом, в пять раз превышающим прочность стали. Но при этом он имеет относительно малый вес (плотность составляет 1.44 г/см³).

СВМПЭ проявляет уникальные механические свойства, обладает высокой износостойкостью, стойкостью к удару, истиранию и абразивному износу, превосходя по данным качествам другие полимеры и многие сорта стали (плотность составляет 0,95 г/см³). Известно [7, 17], что волокна СВМПЭ имеют специфическую фибриллярную структуру, которая образована фибриллярными белками. Фибриллярные белки придают тканям и структурам жесткость, прочность, эластичность. К ним относятся основные структурные белки соединительной ткани животных: коллаген и эластин, кератины волос и роговых образований, фиброин натурального шелка и др. Фибриллы в волокнах СВМПЭ имеют «шиш-кебабную» структуру длиной 50–70 нм. Структура типа «шиш-кебаб» – это своеобразные структуры в полимерах, напоминающие диски или пластины, нанизанные на общий стержень. Удержание высокоскоростного удара полимерными волокнами с фибриллярной структурой обеспечивается комплексным механизмом торможения роста трещин:

- отщепление микрофибрилл с поверхности волокон при деформации и накопление дефектов создают барьеры на пути трещин;
- затупление вершины трещины вследствие многостадийного протекания релаксационных процессов и принудительного гашения колебания;
- низкая чувствительность волокон к концентраторам напряжений.

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАСТИН

Была разработана технология изготовления многослойных пластин, применяемых для средств индивидуальной и локальной легкой бронезащиты [3, 18–22]. На первом этапе было проведено комплексное исследование выбранных полимерных материалов. Получены механические показатели отдельных слоев выбранных материалов, необходимые для рас-

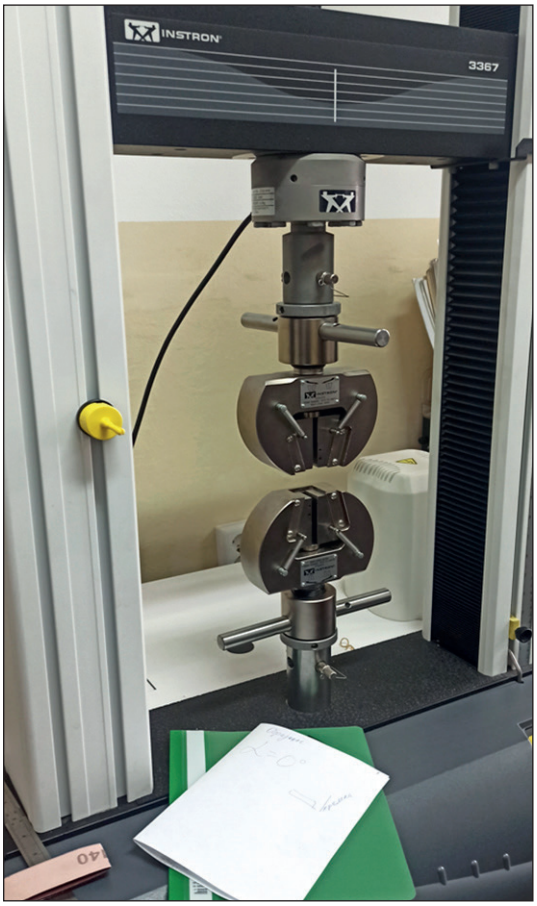


Рис. 1. Электромеханическая разрывная машина INSTRON 3368

чета на прочность многослойной пластины. Образцы представляли собой полосы из пленок СВМПЭ и тканей марки Кевлар, арамидных тканей. Испытание на растяжение образцов размером 150×20 мм проводили по ГОСТ 11262 на разрывной машине INSTRON 3368 (рис. 1), при скорости перемещения захватов 10 мм/мин. На рис. 2, 3 представлены графики зависимости нагрузки от деформации при растяжении образцов, получены значения жесткостных характеристик материала: одного слоя, двух и трех слоев.

Раскрой тканей материала относится ко второму этапу работы по изготовлению бронепластин. Материал для пластин разрезали на куски определенного размера с помощью трафарета. Образование складок и перекрывание слоев ткани при укладке в пресс-форму нежелательно. Раскрой ткани производили на лазерном станке Kamach, где задавали геометрические параметры пластины. При разрезании арамидной ткани или ориентированного полиэтилена появляются некоторые проблемы, типичные для большинства тканей, и проблемы, характерные только для арамидных волокон. Если ткань не является симметричной, изгиб нитей основы и утка различен, то при разрезании необходимо учитывать направление ориентации основы. Направление основы также нужно учитывать и при выкладке слоев ткани.

Третий этап работы – это изготовление бронепластины, которая состоит из двух составных элементов: многослойного материала из СВМПЭ и пакета из арамидной ткани, пропитанного эпоксидной смо-

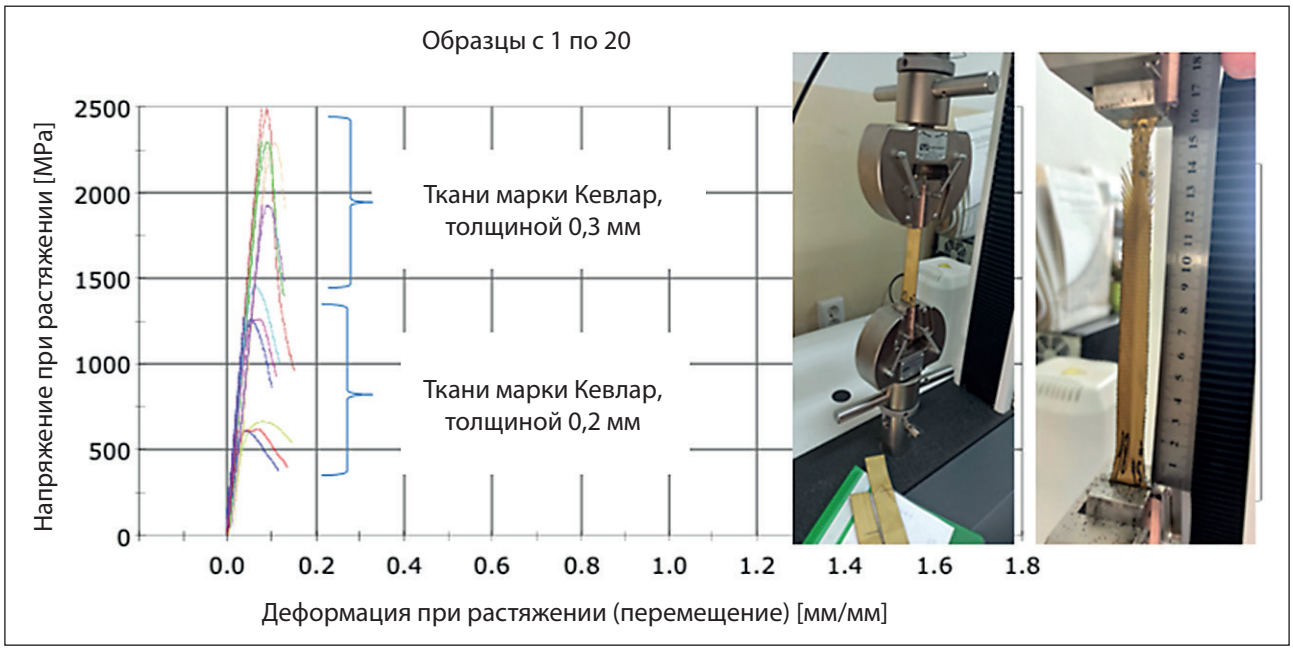


Рис. 2. Графики зависимости нагрузки от деформации при растяжении образцов из арамидных тканей и тканей марки Кевлар

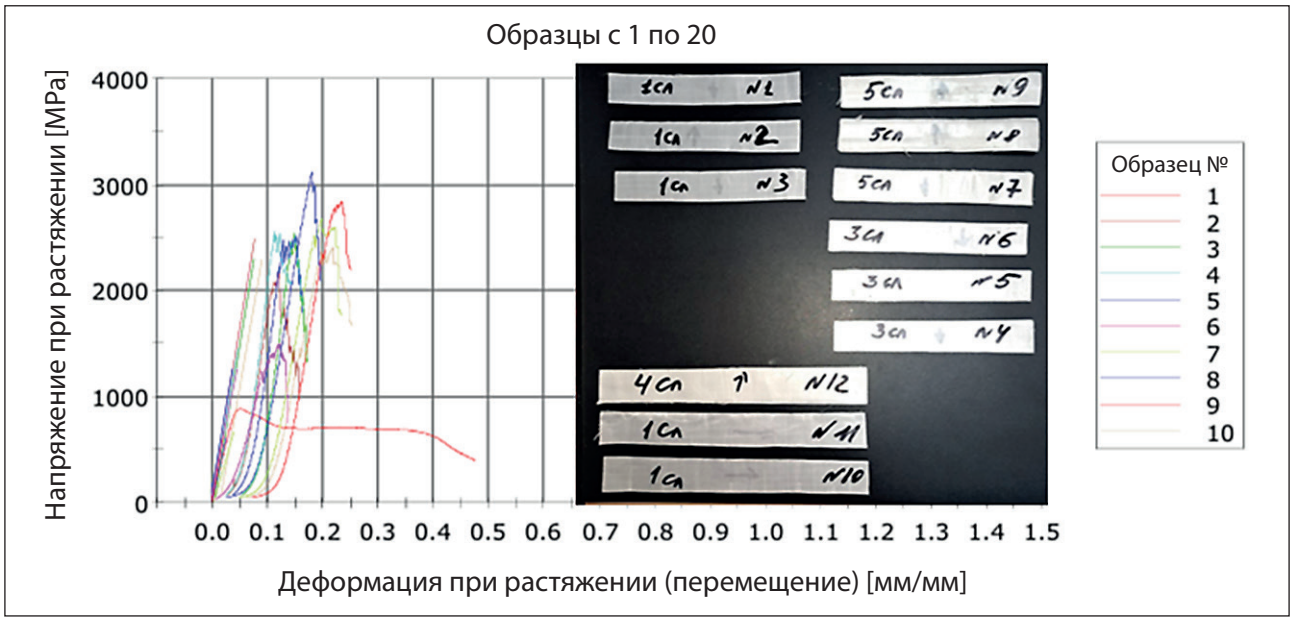


Рис. 3. Графики зависимости нагрузки от деформации при растяжении образцов из СВМПЭ

лой с биодобавками. Первые составные элементы бронепластин принимают на себя высокоскоростной удар и обеспечивают максимальный отбор кинетической энергии ударника и пробиваются по механизму «раздавливания». Для таких элементов необходимы ткани со структурой, которая эффективно преобразует локальное воздействие ударника в распределенный по объему конус деформации. Такой структурой обладают ткани из СВМПЭ. Первые элементы композитных пластин получены методом горячего формования и состоят из разного количества слоев материала СВМПЭ толщиной 0,3 мм (до 100 слоев). Слои представляет собой пленку из совокупности ориентированных нитей, соединенных между собой. Для изготовления элементов пластины из СВМПЭ была разработана, смоделирована и изготовлена обогреваемая пресс-форма высокого давления из алюминия и стали (рис. 4). Пресс-форма высокого давления для полимерных материалов смоделирована с использованием программных продуктов 3D-моделирования в NX10, ANSYS. Горячее формование до 150 °C позволяет получить качественные заготовки с возможностью точного воспроизведения формы. Охлаждение готовых изделий происходит вместе с пресс-формой. Процесс изготовления одного многослойного элемента из СВМПЭ занимает



Рис. 4. Процесс установки и доводки пресс-формы высокого давления

от 10 до 24 часов, в зависимости от температуры нагрева и толщины многослойных элементов.

Тыльные многослойные элементы бронепластин не должны подвергаться большим деформациям, что позволяет минимизировать травмы человека, поэтому изготовлены из плотных арамидных тканей. Многослойные элементы (до 30 слоев) изготавливали из арамидной ткани с эпоксидной смолой (ЭД-20 ГОСТ 10587-84) с биодобавками.

В качестве биодобавок использовали биоактивный материал – коллаген (сухой или в виде геля), полученный во ВСГУТУ из отходов шкур животных. Биоактивный материал имеет кисло-молочную композицию или молочную кислоту и относится к фибриллярным белкам, поэтому введенные биодобавки в хрупкую эпоксидную смолу придают материалу новые упругопластичные свойства [17, 23–24]. В случае применения биодобавок как экспериментально, так и теоретически сталкиваются с проблемой неопределенности распределения частиц по объему в матрице. Разработана методика введения биодобавок с различной массовой концентрацией (от 5–15% мас.) и предложен новый метод равномерного распределения их в полимерной матрице композита [25]. Внедрение биодобавок в матрицу полимерного композиционного материала позволяет изменять физико-механические свойства. Однако существует проблема в равномерном распределении их на поверхности эпоксидной смолы. Существует несколько основных способов внедрения биодобавок в композиционный материал. В частности, путем смешивания биодобавок с эпоксидной смолой в миксере вращением платформы и контейнера. Для лучшей обработки в суспензию с эпоксидной смолой ЭД-20 с биодобавками можно добавить шарики оксида циркония (ZnO_2), общая масса равна массе смеси. Шарики в результате вращения в емкости создают сдвиговые усилия, способствующие разрушению агломератов и равномерному распределению биодобавок в эпоксидной смоле. Также можно использовать ультразвуковую ванну AG SONIC TC-150B с водой, нагретой до 45 °C для равномерного распределения биодобавок в эпоксидной смоле. Ультразвуковая ванна позволяет снижать возникновение пузырьков воздуха, образующихся в процессе механического перемешивания, способствует равномерному распределению частиц. В данной работе использовали ультразвуковую ванну AG SONIC TC-150B с водой, нагретой до 45 °C для равномерного распределения биодобавок в эпоксидной смоле.

Диссипация кинетической энергии при низкоскоростном ударе в многослойных композиционных структурах наблюдается, по мнению авторов, за счет увеличения зоны межслойного дефекта. Исследования дефектов в пластине после испытания показали, что площадь межслойного разрушения значительно выше у модифицированных слоистых композиционных материалов с биодобавками [26]. Установлено, что после испытания на ударную нагрузку, скорость ударника уменьшается на 30–45%, при этом увеличивается зона межслойного дефекта, материал имеет высокую вязкость разрушения. В программном комплексе ANSYS сделан анализ повреждений пластины. В конечно-элементной системе ANSYS/LS-DYNA с дописанными модулями разработаны динамические модели разрушения многослойных пластин, появления дефекта или пробоин от скоростного удара ударником. Были построены 3D-модели ударника и многослойной пластины, которые идентичны экспериментальным образцам. Были построены модели пластин до 100 из слоев СВМПЭ и до 30 слоев из арамидных тканей. Расчет одного компьютерного эксперимента составляет от 6 до 8 часов. При моделировании использовали механические характеристики композитов, которые были получены по расчетным аналитическим формулам и экспериментально [20, 24, 26]. Проведены образцы на удар при скорости удара от 380–500 м/сек. На рис. 5 представлена площадь повреждения пластины из арамидной ткани с добавлением биодобавок в эпоксидную матрицу до 10%. На рис. 6 представлена площадь повреждения пластины из арамидной ткани с добавлением биодобавок в эпоксидную матрицу до 1%. Сделан расчет на прочность многослойной композиционной пластины от действия ударной нагрузки. Получены следующие участки повреждений: 1 – отсутствие повреждений (индикатор синего цвета); 2 – межслойные дефекты (желтый, зеленый индикатор); 0 – полное разрушение (красный индикатор). На рис. 5 площадь повреждения пластины (межслойные дефекты) составляет 32% от всей площади пластины, на рис. 6 площадь повреждения пластин составляет 18%. Каждый слой снижает удар, при этом наблюдается увеличение зоны межслойного дефекта, что соответствует результатам экспериментальных исследований.

Тыльные многослойные элементы пластины были получены формованием в пресс-форме низкого давления. Для изготовления элементов пластины из арамидных тканей была разработана, смоделирована и изготовлена пресс-форма низкого давления из неармированных полимеров. Пресс-форма низкого давления из полимерных материалов разработана и смоделирована с использованием программных продуктов 3D-моделирования в NX10, ANSYS (рис. 7).

При формовании в прессе раскроенный препрег (арамидный материал и неотвержденная смола с биодобавками) помещают в форму (матрицу),

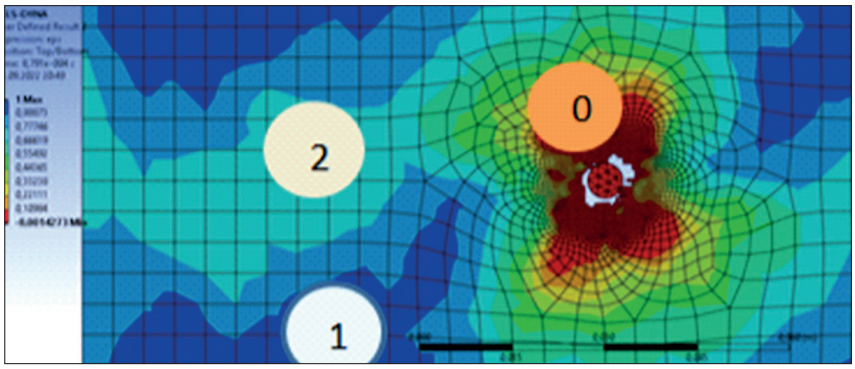


Рис. 5. Площадь повреждения пластины из арамидной ткани с добавлением биодобавок в эпоксидную матрицу до 10%

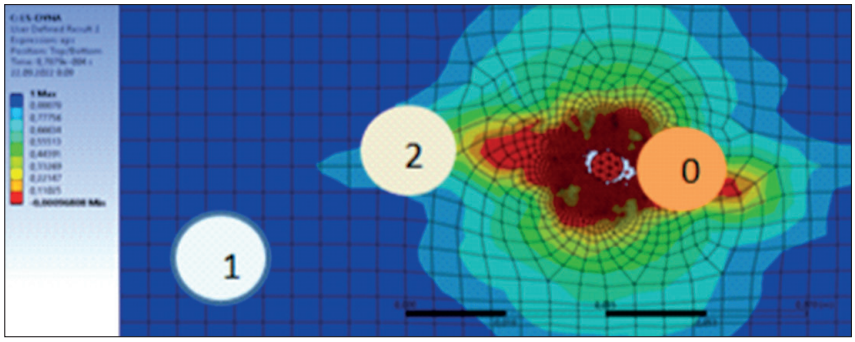


Рис. 6. Площадь повреждения пластины из арамидной ткани с добавлением биодобавок в эпоксидную матрицу до 1%

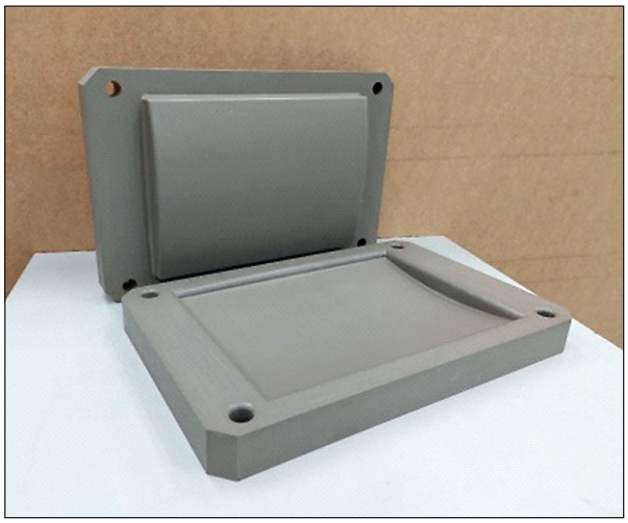


Рис. 7. Пресс-форма низкого давления из полимерных материалов

зажимают ответной частью формы (пуансон), прикладывают внешнее давление 15 т, чтобы изделие приобрело требуемую форму. Давление поддерживают до отверждения смолы. Процесс изготовления одного многослойного элемента занимает до 24 часов.

На последнем этапе изготовления бронепластины многослойные пластины склеивают и обшивают. Полученную бронепластину и элементы взвешивают, измеряют толщину и размеры, записывают в протокол изготовления бронепластины.

ИСПЫТАНИЕ ЛЕГКОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ

Разработки композитной структуры для легкой брони в связи со сложностью процессов, имеющих место при динамических скоростях нагружения, ориентируются в основном на результаты экспериментальных испытаний [27, 28]. Были проведены испытания (ударник со скоростью от 390–410 м/сек), температура испытаний до ±40 °C, влажность до 100%. Все результаты испытаний занесены в протокол испытаний.

ВЫВОДЫ

Главное преимущество разработанных бронепластин – это небольшой вес; отсутствие рикошета и отсутствие отдачи, т.е. отсутствие травматических последствий после удара; нет осколков. Предложено изготовление многослойных пластин из арамидных тканей с применением биодобавок. Эта работа будет интересна ученым и инженерам, которые занимаются исследованием поведения многослойных пластин из композиционных материалов при динамических нагрузках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Легкие баллистические материалы / под ред. А. Бхатнагар. М.: Техносфера.2006. 394 с.
2. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 191 с. ISBN: 978-5-7038-4001-6 EDN: ZCKSNL
3. Бохоева Л.А., Курохтин В.Ю., Чермошенцева А.С., Перевалов А.В. Моделирование и технология изготовления конструкций авиационной техники из композиционных материалов. *Вестник ВСГУТУ*. 2013;2(41):12–18.
4. Ткаченко Н.А. Разработка мягкого бронепакета, соответствующего классам защиты БР1, С и С2 (не менее 550 М/С) ГОСТ 34286-2017. *Инженерный вестник Дона*. 2022;3:621–634.
5. Попелхов Д.М., Грошевой С.Н. Бронирование автомобильной техники. *В: Сборник материалов конференции III Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 105-летию со дня рождения Ивана Кирилловича Яковлева*. Новосибирск;2023. С. 82–89. EDN: TABVKU
6. Сильников Н.М., Пучков А.С., Печеник Р.А. Разработка комплекта дополнительного бронирования для автомобиля Урал – 4320. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2023;3(128):92–97. https://doi.org/10.53816/2075-3608-2023-3-92 EDN: TUXHDJ
7. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. *Санкт-Петербург: Науч. основы и технологии (НОТ)*. 2009;658. EDN: RBBLMR
8. Беклемышева К.А., Петров И.Б. Моделирование разрушения гибридных композитов под действием низкоскоростного удара. *Математическое моделирование*. 2018;30(11):27–43. EDN: VMLDMT
9. Рогов В.Е., Бохоева Л.А., Чермошенцева А.С. *Способ получения слоистого пластика*. Патент РФ 2715188. Заявитель и патентообладатель ООО МИП «Байкальский научный центр прочности». МПК B32B27/18, B82Y30/00 опубл. 25.02.2020, Бюл. № 6.
10. Тихонов И.Н., Крючков В.Г., Звездов А.И., Соколов Б.С., Тихонов Г.И. *Многослойная бронезащита*. Патент РФ 2781964. Заявка № 2022108864 от 04.04.2022. EDN: TCSCNY
11. Самойлов Д.А., Фарух М.А. *Индивидуальная бронезащита*. Патент РФ 2818875. Заявка от 06.02.2023.
12. Новиков В.А. Бронежилеты: современные материалы и их свойства. *В: Междун. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова*. Белгород. 2015. С. 1443–1446. EDN: USQKHD
13. Гладышев С.А. Григорян В.А. *Броневые стали*. М.: Интермет Инжиниринг, 2010. 334.
14. Морозова Т.В., Дворцевая А.М., Куприянова Е.В., Осипчик В.С. Исследование перспективных арамидных волокон Русар-С в средствах индивидуальной бронезащиты. *Успехи в химии и химической технологии*. Том XXXIII. 2019;(6):65-15.
15. Мыльникова В.В., Абросимова А.А., Романова И.Д., Романова А.Д. Анализ материалов и их свойств, применяемых для средств индивидуальной бронезащиты. *Успехи современного естествознания*. 2014;(9–2):143–147. EDN: SOBXFD
16. Кулаков Н.А., Любин А.Н. Особенности конструкции композитной брони повышенной живучести. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2011;1(11):46–51. EDN: NEGJZH
17. Балданов А.Б., Бохоева Л.А., Шалбуев Д.В., Тумурова Т.Б. Биодобавки на основе коллагена в полимерных композиционных материалах. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(2):137–144. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-137-144 EDN: PZKGOD
18. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования*. М.: Издательство «РадиоСофт», 2008. 406 с.
19. Бохоева Л.А., Пнев А.Г., Дамдинов Т.А. Моделирование и технология изготовления лопасти вертолета из композиционных материалов. *Системы. Методы. Технологии*. 2011;2(10):16–20. EDN: OKCBRF
20. Бохоева Л.А., Перевалов А.В., Чермошенцева А.С., Курохтин В.Ю., Лыгденов Б.Д., Рогов В.Е. Экспериментальное определение характеристик сопротивления усталости изделий авиационной техники. *Вестник ВСГУТУ*. 2013;5(44):46–53. EDN: REQXQN
21. Бохоева Л.А., Перевалов А.В., Чермошенцева А.С., Ергонов В.П., Рогов В.Е. Разработка стендов для ресурсных испытаний изделий авиационной и другой техники. *Вестник ВСГУТУ*. 2013;6(45):31–35. EDN: RRYRTZ
22. Крюков Д.Б. Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2023;1(25):20–28. https://doi.org/10.25686/2542-114X.2023.1.20 EDN: KNOFLA

23. Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Рогов В.Е., Чермошенцева А.С., Амин Т. Влияние добавления нанопорошков на прочность многослойных композитных материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021;87(8):42–50. https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-8-42-50 EDN: EOQGON

24. Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Бочектуева Е.Б., Балданов А.Б., Шатов М.С., Батуев Ц.А. Применение наноразмерных компонентов в многослойных композиционных материалах. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16(2):180–188. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-2-180-188 EDN: OIXLJE

25. Балданов А.Б., Базарова В.Д., Иванов Р.П., Цыденова А.Ж. Исследование распределения нанопорошка методом электростатического напыления в композиционном материале. *В: VIII Международная конференция проблемы механики современных машин. Сборник статей конференции*. Улан-Удэ,2022;119–122. https://doi.org/10.53980/9785907599055_119 EDN: BDCKAU

26. Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Рогов В.Е. Особенности межслойного разрушения при ударном нагружении композиционных материалов с переменным углом укладки слоев. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2024;2:50–60. https://doi.org/10.17804/2410-9908.2024.2.050-060 EDN: WGXTSX

27. Бохоева Л.А., Пнев А.Г., Филиппова К.А. Разработка алгоритма автоматической обработки результатов эксперимента образцов из композиционных материалов с дефектами. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2010;4:10–16. EDN: PAODCP

28. Бохоева Л.А., Балданов А.Б., Перевалов А.В., Бочектуева Е.Б., Рогов В.Е., Иванов Ю.Н., Бобарика И.О. Испытание на удар многослойных композиционных образцов. *В: VIII Международная конференция проблемы механики современных машин. Сборник статей конференции. Улан-Удэ*, 2022;412–416. https://doi.org/10.53980/9785907599055_412 EDN: OSNRAK

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бохоева Любовь Александровна – доктор технических наук, профессор, зав. кафедры «Информационные технологии и прикладная механика» строительного факультета, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия, bohoeva@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6986-4307

Рогов Виталий Евдокимович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия, rogov54v@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2249-0827

Бочектуева Елена Баторовна – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Информационные технологии и прикладная механика» строительного факультета, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия, bochektueva.e@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5595-5670

Балданов Алдар Батомункуевич – старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и прикладная механика» строительного факультета, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия, aldarbaldanov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7655-215X

Иванов Роман Петрович – магистрант кафедры «Информационные технологии и прикладная механика» строительного факультета, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия, iv-roman01@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-9248-037X

ВКЛАД АВТОРОВ

Бохоева Л.А. – научное руководство; анализ результатов исследования; написание статьи; составление итоговых выводов.

Рогов В.Е. – разработка концепции и методологии исследования.

Бочектуева Е.Б. – литературный обзор; теоретический анализ.

Балданов А.Б. – проведение численных расчетов.

Иванов Р.П. – проведение экспериментальных работ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 07.04.2025; принята к публикации 10.04.2025.

PUBLICATION ETHICS AND PREVENTION OF MALPRACTICE PUBLICATION

Compliance requirements of publication ethics in the preparation and publication of the journal Science Editor and Publisher apply to all members of the publishing process, i.e., authors, editors, reviewers, and the publisher of the journal. The editorial board monitors compliance with the ethics requirements based on the manuals prepared by international specialized organizations, associations and publishers, as well as the Association of Science Editors and Publishers. The main standards relied on by the journal «Nanotechnologies in construction» are those developed by the Committee on Publication Ethics (Committee on Publication Ethics) in the United Kingdom, by the publisher Elsevier (Netherlands), and other non-Russian editorial associations and information systems, as well as the declaration of «Ethical Principles of Scientific Publications», adopted by the Association of Science Editors and Publishers (Russia).

The responsibility of the authors of material for the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The author submits materials for review, which have not been previously published. If the article is based on previously published material which are not academic articles or based on materials presented on the Internet, the author should notify the editorial staff of the journal.
2. The author does not submit the same article to different journals for review.
3. All co-authors consent to the submission of their articles to the journal.
4. The author should inform the editorial staff about a potential conflict of interest. In the case of the absence of any competing interests the author should claim that by writing «Author declare the absence of any competing interests» in the paper.
5. The author takes the necessary steps to ensure the correctness of citations in the submitted article.
6. The list of authors included only individuals who have made significant contributions to the research.
7. The author correctly cites his or her previous work as to avoid self-plagerism in the manuscript and the artificial increase of volume of publications (salami-slicing).
8. The author, who is acting as the contact with journal, informs all other co-authors of all changes and suggestions from the editorial staff, and does not make decisions regarding the article alone without the written consent of all co-authors.
9. The author properly corresponds with the reviewer through contact with the editor and responds to comments and observations if they arise.
10. If necessary, the authors either adjust the data presented in the article, or refute them.

Responsibility of the editors of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editors are personally and independently responsible for the content of the materials published and recognize that responsibility. The reliability of the work in question and its scientific significance should always be the basis in the decision to publish.
2. The editors of the journal can check the materials with anti-plagiarism system «Antiplagiat» detecting borrowed fragments to provide copyright protection.
3. The editors make fair and objective decisions, regardless of any commercial considerations and provide a fair and efficient process for the independent review.
4. The editors evaluate manuscripts' intellectual content without regard to race, gender, sexual orientation, religion, origin, nationality, and/or the political preferences of the authors.
5. The editors do not work with articles for which they have a conflict of interest.
6. The editors resolve conflict situations arising during the editorial process, as well as use all available means to resolve these situations.
7. The editors of the journal publish information concerning corrections, rebuttals, and review articles in case the need arises.
8. The editors of the journal do not publish the final version of the article without the consent of the authors.

The responsibility of the reviewers of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The reviewer evaluates his or her own availability before the examination of the manuscript and accepts materials for review only if the reviewer is able to allow for sufficient time as to ensure the quality his or her work.

2. The reviewer must use the form created by the editors and delivered with paper. The reviewer may give extended review.

3. The reviewer notifies the editorial staff of any conflict of interest (if one exists) before the start of the review of the paper.

In the case of the absence of any competing interests the reviewer should claim that by writing «The reviewer declares the absence of any competing interests» in the review.

4. The reviewer does not send information about the article and or any of the data contained within the article to any third party.

5. The reviewer does not use the information obtained from the article for any personal and or commercial purposes.

6. The reviewer does not make conclusions about the quality of the article on the basis of subjective data, e.g. the personal relationship to the author, gender, age, religion, etc.

7. The reviewer uses only proper and appropriate language and explanations in respect to the articles, avoiding any personal remarks.

The responsibility of the publisher of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The publisher not only supports scientific communication and invests in the process, but is also responsible for complying with all current guidelines and standards for publishing scientific work.

2. The publisher does not affect the editorial policy of the journal.

3. The publisher provides legal support to the journal if necessary.

4. The publisher provides for the timely release of futures issues of the journal.

5. The publisher publishes changes, explanations, and recalls articles that have been identified to contain scientific misconduct and or critical errors.

The responsibility of the editor-in-chief of the journal «Nanotechnologies in construction»

1. The editor-in-chief is responsible for making a decision which of submitted papers are to be published in the journal. This decision always must be based on the examination of paper reliability and its importance for scientists and readers. The editor-in-chief may be guided by methodical recommendation elaborated by the editorial board of the journal. He also may take into account legal requirements, such as exclusion of libel, infringement of copyright and plagiarism. When making decision on the publication, the editor-in-chief may consult with the members of editorial board, reviewers.

2. The editor-in-chief evaluates submitted papers by the intellectual content, regardless of the race, sex, sexual preference, religion, ethnic origins, citizenship and political views of the author.

3. The editor-in-chief, editorial staff, members of the editorial board must not disclose information on the submitted manuscript to the third person except for the author, reviewers, potential reviewers, and the publisher.

4. The information contained in the submitted paper cannot be used in the paper of the editor-in-chief, members of the editorial board without author's written permission. Confidential information or ideas obtained during review must be kept in secret and must not be used for self-profit.

5. The editor-in-chief should not review the paper if there is a conflict of the interests evolving from competition, cooperation or other relations with someone from the authors, companies and organizations which are related to the paper.

6. The editor-in-chief should ask all authors to present information on the certain competitive interests and publish corrections if the conflict of the interests has been revealed after the publication. If necessary another appropriate action such as publication of disproof or expression of a concern can be performed.

7. The editor-in-chief should take reasoned and prompt measures if he gets complaints of ethnic character in respect to the submitted manuscript or issued paper, contacting with the editors and publisher.

Complaints and appeals handling

In the case of incoming complaints and appeals a commission is formed. The commission can consist of the publisher, the editor-in-chief, deputy editor-in-chief, members of editorial council, authors and specialists which are competent in the considering subjects.

An investigation is held and the results of it are reported to all interested parties. According to laws, if it is necessary, the materials are delivered to competent state bodies.

Policy of disclosure and conflicts of interest /competing interests

Unpublished data from manuscripts submitted for consideration can not be used for personal research without the expressed written consent of the author.

Information or ideas obtained through peer review and related actives, which potentially can be beneficial to any party other than the author, must be kept confidential and not be used for personal gain.

The editors and reviewers should not participate in the examination of manuscripts in the event of a conflict of interest that is a result of any competitive, cooperative, and or other interactions and relationships with any of the authors, companies, and or other organizations involved in the creation or presentation of the works.

The politics of the journal concerning data exchange and reproductibility

The journal papers (metadata of papers) are available for free access at the journal's website and at the websites of different citation systems (data bases).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons CC-BY «Attribution». This kind of license allows other people to distribute, edit, correct and base on the work of the authors, even with commercial purpose, while the authors mention them as co-authors. The license is recommended to distribute widely and use licensed materials.

The politics of the journal concerning data exchange and reproducibility are aimed at providing «transparent» science and transparency is a guarantee of high-quality research and innovations.

Ethical oversight of the published materials

The publisher and the editor-in-chief should deal with protection of reputation of the published materials by studying and evaluating claimed or potential delinquency (research, publications, reviews and editorial activities) jointly with scientific community.

That means interaction with the author of the manuscript and detailed consideration of the complaints or declared reclamations. To detect such delinquencies as plagiarism, the editor must use proper license software or systems.

If the editor-in-chief obtains proved evidence of delinquency, he must inform the publisher and the members of editorial council about this, as well as immediately notify the author about necessity to correct the paper or paper retraction (in dependence on the situation).

Derivation and plagiarism

During the consideration of an article, the editorial staff of the journal «Nanotechnologies in construction» may conduct a verification of the submitted materials with the help the Anti-plagiarism system. In the case of the discovery of multiple incidents of content matching, the editorial staff acts in accordance with the rules of COPE.

Intellectual property

The editors should carefully deal with the issues concerning intellectual property and interact with the publisher when settling the cases of probable delinquencies and agreements on intellectual property protection.

The editors aside from using plagiarism detecting tools can also:

– support the authors whose copyright was infringed or those who suffered from plagiarism;
– cooperate with the publisher to protect copyright and to pursue infringer (for example, by applying for paper retraction or removing materials from websites).

Discussion of the papers published in the journal. Corrections made after publication

The editors must be open for the researches that oppose the papers published earlier in the journal; to encourage and to be ready to consider valid criticism of the papers published in the journal.

The authors of the criticized works should have an opportunity to respond the criticism. The papers describing only negative results can also be published.

Preprint and postprint policy

During the submission process, the author must confirm that the article has not been published and or accepted for publication in any other journal. When citing articles published in the journal «Nanotechnologies in construction», the publisher requests the authors to provide a link (the full URL of the material) to the official website of the journal.

Articles, which have been previously posted by the author on personal and or public websites that have no relationship to any other publishers, are allowed to be submitted to the journal.

On the procedure in case of abusive practice (infringement)

Publisher, editor-in-chief, each member of editorial staff member of editorial board, author, reviewer or reader must comply journal's Publication Ethics and are obliged to report any known facts concerning committed or potential infringement.

The journal's editors immediately launch investigation on all messages that state abusive practice (infringements). If the information is confirmed, the measures to eliminate claimed abusive practice (infringements) will be taken. According to legislation, all materials, if it is necessary, are referred to proper state bodies.

In response to all author's claims the editors give full and substantiated replies and make great efforts to resolve any conflicts.

ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕДОБРОСОВЕСТНОЙ ПРАКТИКИ ПУБЛИКАЦИЙ

Требования соблюдения публикационной этики при подготовке и издании журнала «Нанотехнологии в строительстве» касаются всех участников редакционно-издательского процесса – авторов, редакторов, рецензентов и издателя, создающих этот журнал. Редакция журнала следит за выполнением требований этики, опираясь на руководства, подготовленные зарубежными профильными организациями, ассоциациями и издательствами, а также Ассоциацией научных редакторов и издателей. Основными документами, на которые опирается редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве», являются разработки Комитета по публикационной этике (Committee on Publication Ethics), Великобритания, издательства Elsevier (Нидерланды) и других зарубежных редакторских ассоциаций и информационных систем, а также Декларация «Этические принципы научных публикаций», принятая Ассоциацией научных редакторов и издателей (Россия).

Ответственность авторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Автор отправляет на рассмотрение статью, материалы которой ранее не были опубликованы. Если статья основана на ранее опубликованных материалах не статейного характера или материалы представлены в Интернете, следует уведомить об этом редакцию журнала.
2. Автор не отправляет на рассмотрение одну статью в разные журналы.
3. Все соавторы согласны на представление статьи в журнал.
4. Автор уведомляет редакцию о потенциальном конфликте интересов. Об отсутствии конфликта интересов автор указывает в статье – «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».
5. Автор предпринимает необходимые меры, чтобы убедиться в корректности представленных в статье цитирований.
6. В список авторов включаются только лица, внесшие значительный вклад в проведение исследования.
7. Автор корректно цитирует свои предыдущие работы и избегает самоплагиата в рукописи и искусственного увеличения объема публикаций (salami-slicing).
8. Контактный автор уведомляет своих соавторов обо всех изменениях и предложениях со стороны редакции журнала и не принимает решений относительно статьи единолично, без письменного согласия всех соавторов.
9. Автор корректно ведет переписку с рецензентом через редактора и отвечает на комментарии и замечания, если они возникают.
10. При необходимости авторы корректируют представленные в статье данные или опровергают их.

Ответственность редакторов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Редакторы журнала самолично и независимо несут ответственность за содержание публикуемых материалов и признают эту ответственность. Достоверность рассматриваемой работы и ее научная значимость всегда должны лежать в основе решения о публикации.
2. Редакторы журнала могут проверить полученные материалы в системе Антиплагиат по обнаружению заимствований, способствуя защите авторского права.
3. Редакторы принимают честные и объективные решения независимо от коммерческих соображений и обеспечивают честный и эффективный процесс независимого рецензирования.
4. Редакторы оценивают интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от расы, пола, сексуальной ориентации, религиозных взглядов, происхождения, гражданства или политических предпочтений Авторов.
5. Редакторы не работают со статьями, в отношении которых у них есть конфликт интересов.
6. Редакторы журнала разрешают конфликтные ситуации, возникающие в процессе работы, и используют для их разрешения все доступные средства.
7. Редакторы журнала публикуют информацию об исправлениях, опровержениях и отзывах статей в случае возникновения такой необходимости.
8. Редакторы журнала не публикуют конечный вариант статьи без его согласования с авторами.

Ответственность рецензентов журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Рецензент оценивает свою занятость перед согласием на экспертизу рукописи и соглашается на рецензирование только при наличии достаточного времени на качественную работу.

2. Рецензент использует разработанную редакцией журнала форму, которую он получает вместе со статьей. Рецензент вправе дать более расширенную рецензию.

3. Рецензент предупреждает редакцию о наличии конфликта интересов (если он возник) до начала работы со статьей.

Об отсутствии конфликта интересов рецензент указывает в рецензии – «Рецензент заявляет об отсутствии конфликта интересов».

4. Рецензент не передает сведения о статье и данные, которые в ней содержатся, третьим лицам.

5. Рецензент не использует информацию, полученную из статьи, в личных и коммерческих целях.

6. Рецензент не делает выводов о качестве статьи на основе субъективных данных: личного отношения к автору, его пола, возраста, вероисповедания.

7. Рецензент использует только корректные выражения и объяснения в отношении статьи, не переходит на личности.

Ответственность издателя журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Издатель не только поддерживает научные коммуникации и инвестирует в данный процесс, но также несет ответственность за соблюдение всех современных рекомендаций в публикуемой работе.

2. Издатель не влияет на редакционную политику журнала.

3. Издатель оказывает юридическую поддержку редакции журнала при необходимости.

4. Издатель обеспечивает своевременность выхода очередных выпусков журнала.

5. Издатель публикует правки, пояснения и отзывает статьи, в которых были выявлены нарушения научной этики или критические ошибки.

Ответственность главного редактора журнала «Нанотехнологии в строительстве»

1. Главный редактор отвечает за принятие решения о том, какие из представленных в редакцию журнала работ следует опубликовать. Это решение всегда должно приниматься на основе проверки достоверности работы и ее важности для исследователей и читателей. Главный редактор может руководствоваться методическими рекомендациями, разработанными редколлегией журнала, и такими юридическими требованиями как недопущение клеветы, нарушения авторского права и плагиата. Также при принятии решения по публикации главный редактор может советоваться с членами редсовета, редколлегии, рецензентами.

2. Главный редактор оценивает представленные работы по их интеллектуальному содержанию, невзирая на расу, пол, сексуальную ориентацию, религию, этническое происхождение, гражданство или политические взгляды автора.

3. Главный редактор, сотрудники редакции, члены редколлегии не должны раскрывать информацию о представленной рукописи кому-либо другому, за исключением автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, а также издателя.

4. Сведения, содержащиеся в представленной статье, не должны использоваться в какой-либо собственной работе главного редактора и членов редсовета и редколлегии без письменного разрешения автора. Конфиденциальная информация или идеи, полученные при рецензировании, должны храниться в секрете и не использоваться для получения личной выгоды.

5. Главному редактору следует отказаться от своего участия в рецензировании в случае, если присутствует конфликт интересов, проистекающий из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, компаний или учреждений, имеющих отношение к статье.

6. Главному редактору следует требовать от всех авторов журнала предоставлять сведения о соответствующих конкурирующих интересах и публиковать исправления, если конфликт интересов был разоблачен после публикации. В случае необходимости, может выполняться другое подходящее случаю действие, такое как публикация опровержения или выражения озабоченности.

7. Главному редактору следует принимать разумно быстрые меры при поступлении жалоб этического характера в отношении представленной рукописи или опубликованной статьи, имея контакт с редакцией, издателем.

Обработка жалоб и апелляций

В случае поступления жалоб и аппеляций назначается комиссия, в состав которой могут входить: издатель, главный редактор, заместитель главного редактора, члены редакционной коллегии, авторы и специалисты, компетентные в рассматриваемых вопросах. Проводится расследование, результаты которого доводятся всем заинтересованным лицам. При необходимости и в соответствии с законодательством материалы передаются в соответствующие государственные органы.

Политика раскрытия и конфликты интересов/конкурирующих интересов

Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, нельзя использовать в личных исследованиях без письменного согласия Автора.

Информация или идеи, полученные в ходе рецензирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными и не использоваться с целью получения личной выгоды.

Редакторы и рецензенты не должны участвовать в рассмотрении рукописей в случае наличия конфликтов интересов вследствие конкурентных, совместных и других взаимодействий и отношений с любым из авторов, компаниями или другими организациями, связанными с представленной работой.

Политики журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости

Статьи из журнала (метаданные статей) размещаются в открытом доступе на сайте журнала и на сайтах различных систем цитирования (баз данных). Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons CC-BY «Attribution» («Атрибуция»). Эта лицензия позволяет другим распространять, редактировать, поправлять и брать за основу произведение авторов, даже коммерчески, до тех пор, пока они указывают ваше авторство. Лицензия рекомендована для максимального распространения и использования лицензированных материалов.

Политика журнала в отношении обмена данными и воспроизводимости в конечном итоге способствует более «открытой» науке, а открытость научной информации есть гарант исследований и инноваций высокого качества.

Этический надзор за опубликованными материалами

Издатель и главный редактор должны работать над защитой репутации опубликованных материалов путем изучения и оценки заявленных или предполагаемых нарушений (исследований, публикаций, рецензий и редакторской деятельности) совместно с научным сообществом.

Это включает в себя взаимодействие с автором рукописи или тщательное рассмотрение соответствующей жалобы или высказанных претензий. Для выявления таких нарушений, как плагиат, редактор должен пользоваться соответствующими лицензионными системами.

Главный редактор, получивший убедительное свидетельство нарушения, должен сообщить об этом издателю, членам редколлегии, организуя немедленное уведомление автора о необходимости внесения поправок или отзыва публикации, в зависимости от ситуации.

Заимствования и плагиат

Редакция журнала «Нанотехнологии в строительстве» при рассмотрении статьи может произвести проверку материала с помощью системы Антиплагиат. В случае обнаружения многочисленных заимствований редакция действует в соответствии с правилами COPE.

Интеллектуальная собственность

Редакторы должны внимательно относиться к вопросам, касающимся интеллектуальной собственности, и взаимодействовать с издателем при урегулировании случаев возможных нарушений законов и соглашений об охране интеллектуальной собственности.

Редакторы, кроме применения инструментов обнаружения плагиата, могут также:

– поддерживать авторов, чье авторское право было нарушено, или тех, кто стал жертвой плагиата;
– быть готовыми к совместной работе с издателем по защите авторских прав и к преследованию нарушителей (например, путём подачи запросов для отзыва статей или удаления материалов с веб-сайтов).

Обсуждение работ, опубликованных в журнале. Исправления после публикаций

Редакторы должны быть открытыми для исследований, которые оспаривают предыдущие работы, опубликованные в журнале; поощрять и с готовностью рассматривать обоснованную критику работ, публикуемых в их журнале.

Авторы критикуемых материалов должны иметь возможность ответить на критику. Работы, сообщающие только об отрицательных результатах, также могут публиковаться.

Политика размещения препринтов и постпринтов

В процессе подачи статьи автору необходимо подтвердить, что статья не была опубликована или не была принята к публикации в другом научном журнале. При ссылке на опубликованную в журнале «Нанотехнологии в строительстве» статью издательство просит размещать ссылку (полный URL материала) на официальный сайт журнала.

К рассмотрению допускаются статьи, размещенные ранее авторами на личных или публичных сайтах, не относящихся к другим издательствам.

О процедурах в случае злоупотреблений (нарушений)

Издатель, главный редактор, каждый сотрудник редакции, член редакционной коллегии, автор, рецензент и читатель обязаны соблюдать этику научных публикаций в журнале действующих законов, правил или положений и обязуются сообщать о любых известных случаях уже совершенного или потенциального злоупотребления (нарушения).

Редакцией журнала незамедлительно проводится расследование по всем сообщениям о злоупотреблениях (нарушениях) и, если информация подтверждается, принимаются меры по устранению злоупотреблений (нарушений). Если это требуется в соответствии с законодательством, материалы передаются в соответствующие государственные органы.

На все претензии авторов редакция предоставляет развернутые и обоснованные ответы, прилагая все усилия для разрешения конфликтных ситуаций.

AUTHOR GUIDELINES

Admission of articles

The authors submit to the editors:

- electronic manuscript by e-mail: info@nanobuild.ru;
- accompanying letter (the editors send the sample of the letter to the authors on demand).

The authors of the materials published in the journal permit using their content according to the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0); agree to publish full texts (parts or metadata) of the paper in free access in Internet at the official website of the edition (www.nanobuild.ru), citation systems (data bases). All that authors indicate in the cover letter. More details about the license Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) are available here https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

When submitting articles to the journal, it is presumed that:

- the work has not been previously published in any other journal;
- the article is not under consideration in any other journal;
- all co-authors consent to the publication of the article;
- there is implicit or explicit consent of the organization in which the study was conducted.

Information about the conflict of interest

The article should exclude any actual or potential conflict of interest. If there is no conflict of interest, you should write that «the author declares no conflict of interest.»

When submitting a manuscript to the journal, authors should ensure that the content of the paper corresponds the topic of the journal; the structure and the format of the paper meet the editorial requirements; all citations are properly formatted and the source of tables and figures are shown (unless otherwise indicated, it is assumed that the tables and figures created by the author).

Basic sections of the journal:

- construction material science;
- the study of the properties of nanomaterials;
- the results of the specialists' and scientists' researches;
- manufacturing technology for building materials and products;
- international scientific and technical cooperation;
- overview of inventions in the field of nanotechnology;
- development of new materials;
- rational use of natural sources;
- efficient use of recycled resources;
- the application of nanomaterials and nanotechnologies in construction;
- system solutions for technological problems;
- in related sectors;
- forums, exhibitions, conferences and events in the area of construction and nanoindustry.

These are the topics of the papers published in the journal: creation of new functional materials; nanostructured systems strength and penetrability formation theory development; the problems of nanomaterials and nanotechnologies implementation in construction and building materials; cement and other binders with mineral and organic additives; diagnostics of building systems nanostructures and nanomaterials; modification of building materials with nanofibers; disperse composite materials with nanocoating; formation of nanostructure coatings by means of laser sputtering; technologies aimed at studying nanomaterial properties; the systems of teaching the fundamentals of nanotechnologies; technological principles of nanostructures creation (liquid melts, sol and gel synthesis). The topics may be different, directly or indirectly related to the areas mentioned above.

The journal can also publish: original article, review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.

The structure of the paper

IN ENGLISH

NAME OF THE SECTION (In English)
Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.) (In English)
https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x

Title (In English)
Authors' First name. The first letter of the patronymic (if any) Last name (In English)
place of employment of each author, city, country (In English)
(*name of institution (organization) at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.*)
*Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID author:
first name and last name – https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

Abstract: the source of information, which is independent on the paper and which allows Russian and foreign specialists to make conclusion about the quality of the content of the paper (extended abstracts must be informative, original, novelty, contain main results of research, structured according to IMRAD (Introduction, Methods and Materials, Results and Discussion), compact – 200–250 words) (In English):
Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion... Conclusion...
Keywords: (In English) They are separated from each other by commas and there are no dots placed after the last one
Acknowledgments: (if available) (In English)
For citation: (In English)

Example.
For citation: Nizin D.R., Nizina T.A., Spirin I.P., Chibulaev I.A., Pivkin N.A. The effect of the concentration of nanomodifiers and the moisture content of samples on the change in the properties of epoxy polymers. *Nanotechnologies in Construction.* 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

© authors, 2025

Text of the paper: (In English, number of words 3000–6000)
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSIONS**

References (In English) (according to Vancouver Style).

Example:
1. Nizin D.R., Nizina T.A., Maryanova A.V., Mironov E.B. Moisture absorption of 3D-printed PETG plastic Samples. *Bulletin of MGSU.* 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. Science. 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature.* 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a
4. Mekeko N., Tikhonova E. Description of Author Contributions while Submitting a Manuscript: The CREDITSystem. *Journal of Employment and Career.* 2022;1(4):5–7. (In Russ.) https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Note: 1. The titles of journals, books, etc. are indicated in italics.
2. Materials published only in Russian are indicated (In Russ.)

Additional information (on the use of generative artificial intelligence and artificial intelligence-based technologies) (In English)

Examples:
The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.
or
During the preparation of this article, [tool/service name] was used for [reason]. After employing this tool/service, the content has been revised and edited as needed and I take full responsibility for the content of the published article.

Information about the author (authors) (In English)
– First name The first letter of the patronymic (if any) Last name (full);
– academic degree;
– academic title;
–name of institution (organization) and its department at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.;
– address of the institution (organization), its department at which the author works or studies (city and country);
– authors' e-mail address;
– Open Researcher and Contributor ID (ORCID) (if available).
E-mail address is given without word "e-mail" and is not followed by dot. ORCID is given as an electronic address in Internet and is not followed by dot. Name of institution (organization), its address, e-mail address and ORCID of the author are separated with a comma.
The editors can give additional information about the author: position, honorary title, membership in organizations, etc.

Example.
Zhanna V. Pisarenko – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russia,
z.pisarenko@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0002-9082-2897

Contribution of the authors (In English):
author's First name The first letter of the patronymic (if any) Last name (full); author's personal contribution in article writing is briefly described (concept, collection of materials, analytical work, article writing, scientific editing of the text, etc.).

Example.
Marina S. Morozova – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.
Elena V. Bokova – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.

IN RUSSIAN

NAME OF THE SECTION (In Russian)
Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, article reviews, etc.) (In Russian) / (In English)
https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x

Title (In Russian)

Authors' first name and last name (In Russian)
place of employment of each author, city, country (In Russian)
(*name of institution (organization) at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc.*)
* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID author:
first name and last name (In Russian) - https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

Abstract: the source of information, which is independent on the paper and which allows Russian and foreign specialists to make conclusion about the quality of the content of the paper (extended abstracts must be informative, original, novelty, contain main results of research, structured according to IMRAD (Introduction, Methods and Materials, Results and Discussion), compact – 200–250 words) (In Russian):
Abstract: Introduction... Methods and Materials... Results... Discussion... Conclusion...
Keywords: (In Russian)
Acknowledgments: (if available) (In Russian)
For citation: (In Russian)

Example.
Для цитирования: Низин Д.Р., Низина Т.А., Спирин И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А. Влияние концентрации наномодификаторов и влагосодержания образцов на изменение свойств эпоксидных полимеров. *Нанотехнологии в строительстве.* 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

Article Metadata (In English)
The title of the article (In English)
First name The first letter of the patronymic (if any) Last name of the author(s) (In English)
mandatory indication of the affiliation for each author, city, country (In English)
* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx
Abstract: Introduction… Methods and Materials… Results… Discussion…Conclusion…(In English)
Keywords: (In English)
Acknowledgments: (if any) (In English)
For citation: (In English)

© authors, 2025

Text of the paper: (In Russian, number of words 3000–6000)
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSIONS**

References (in the original language of the article – Russian or English) (Vancouver Style)

Example:
1. Низин Д.Р., Низина Т.А., Марьянова А.В., Миронов Е.Б. Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика. *Вестник МГСУ.* 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. Science. 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature.* 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a
4. Мекеко Н.М., Тихонова Е.В. Описание авторского вклада при подаче рукописи: система CREDIT. *Журнал Работа и Карьера.* 2022;1(4):5–7. https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Note: 1. The titles of journals, books, etc. are indicated in italics.

Additional information (on the use of generative artificial intelligence and artificial intelligence-based technologies) (In Russian)

> ***Examples:***
> The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.
> *or*
> During the preparation of this article, [tool/service name] was used for [reason]. After employing this tool/service, the content has been revised and edited as needed and I /we take full responsibility for the content of the published article.

Information about the author (authors) (In Russian)
– Last name First name Patronymic (if any) (full);
– academic degree;
– academic title;
– name of institution (organization) and its department at which the author works or studies is given without legal form: Ltd, SOE, etc. (affiliation);
– address of the institution (organization), its department at which the author works or studies (city and country);
– authors' e-mail address;
– Open Researcher and Contributor ID (ORCID) (if available).
E-mail address is given without word "e-mail" and is not followed by dot. ORCID is given as an electronic address in Internet and is not followed by dot. Name of institution (organization), its address, e-mail address and ORCID of the author are separated with a comma.
The editors can give additional information about the author: position, honorary title, membership in organizations, etc.

> ***Example.***
> **Писаренко Жанна Викторовна** – доктор экономических наук, профессор кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия, z.pisarenko@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0002-9082-2897

Contribution of the authors (In Russian):
author's last name and initials; author's personal contribution in article writing is briefly described (concept, collection of materials, analytical work, article writing, scientific editing of the text, etc.).

> ***Example.***
> **Морозова М.С.** – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.
> **Бокова Е.В.** – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

The authors declare no conflicts of interests. (In Russian)

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X. (In Russian)

Manuscript text

File format
The editors accept texts saved using Microsoft Word in .rtf format.

Text layout
- Use the font Times New Roman, font size – 14 pt., and 1.5 line spacing;
- Do not use an underscore in the text (for subtitles – use bold, to highlight text – use italics);
- Non-Russian languages titles (journals, organizations, etc.) should be left in the original, enclosed in quotes.

Abbreviations

All abbreviations should be defined when first used. If the article contains a large number of abbreviations, a list deciphering each of them can be included before the text of the article

Tables and Figures

All tables and figures must be numbered and identified, they should be a reference in the text. The tables should not contain empty columns. Figures should be of good quality, suitable for printing. Figures should be submitted together with the article, with each figure submitted as an individual file.

One way to check the quality of the image, is to increase its size using any image manipulation software. A high quality image is not burred or distorted when enlarged.

Footnotes

If necessary, use footnotes with continuous numbering (Arabic numerals) throughout the document. Footnotes can be quotes from the works mentioned in the text, for more information.

Citations and bibliography

The journal requires the use of the Vancouver Citation Style (a reference in the text in square brackets, full bibliographic description of the source in the bibliography in the order mentioned in the text of the article).

The editorial board would like to remind the authors to take into account the citation policy of the journal when preparing the References section.

A proper citation (References) not only shows the quality of the research, but it also ensures that the cited publications will be taken into account when assessing the scientific work of the author. International indexing databases format all submitted references according to a unified structure. Therefore, strict requirements for unification and standardization apply to this section of scientific articles.

The journal uses an adapted version of Vancouver Citation Style, one of the styles recognized by international indexing databases.

References

The list of references includes sources used in the text.

References accepted for publication but not yet published articles must be labeled with the words “in press”; authors should obtain written permission to refer to these documents and evidence that they are accepted for publication. Information from unpublished sources must be marked with the words “unpublished data / documents,” the authors must also receive written confirmation of the use of such materials. The journal adopted the Vancouver style of reference design and citation.

Copyright Notice

Authors who publish in journal agree to the following:

1. Authors retain copyright of the work and provide the journal right of first publication of the work.

2. The authors retain the right to enter into certain contractual agreements relating to the non-exclusive distribution in the published version of the work here form (eg, post it to an institutional repository, the publication of the book), with reference to its original publication in this journal.

3. The authors have the right to post their work on the Internet (eg in the institute store or personal website) prior to and during the review process of its data log, as this may lead to a productive discussion and a large number of references to this work.

Privacy Statement

Specified when registering the names and addresses will be used solely for technical purposes of a contact with the Author or reviewers (editors) when preparing the article for publication. Private data will not be shared with other individuals and organizations.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Прием статей

Авторы представляют в редакцию:

- рукописи в электронном виде по e-mail: info@nanobuild.ru;
- сопроводительное письмо (редакция высылает авторам образец по их предварительному запросу).

Авторы публикуемых в журнале материалов допускают использование контента в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0); согласны с размещением в открытом доступе полных текстов статей (их составных частей или метаданных) в Интернете на сайте издания (www.nanobuild.ru), в системах цитирования (базах данных). Об этом авторы указывают в сопроводительном письме. Подробно о лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0) смотрите здесь https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru.

Представление статьи в журнал подразумевает, что:

- работа не была опубликована ранее в другом журнале;
- не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие – неявное или явное – организации, в которой исследование было проведено.

Информация о конфликте интересов

В статье следует указать на реальный или потенциальный конфликт интересов. Если конфликта интересов нет, то следует написать, что «автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что содержание статьи соответствует тематике журнала; структура статьи и оформление соответствуют требованиям редакции; все цитирования оформлены корректно, указаны источники для таблиц и рисунков (если не указано иное, предполагается, что таблицы и рисунки созданы автором).

Основные разделы журнала:

- строительное материаловедение;
- исследование свойств наноматериалов;
- результаты исследований ученых и специалистов;
- технологии производства строительных материалов и изделий;
- международное научно-техническое сотрудничество;
- обзор изобретений в области наноиндустрии;
- разработка новых материалов;
- рациональное использование природных ресурсов;
- эффективное использование вторичного сырья;
- применение наноматериалов и нанотехнологий в строительстве;
- системные решения технологических проблем;
- в смежных отраслях;
- форумы, выставки, конференции, мероприятия строительной отрасли и наноиндустрии.

В журнале публикуются работы по следующим темам: создание новых функциональных материалов; разработка теории формирования прочности и непроницаемости наноструктурированных систем; проблемы применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве и строительных материалах; цементные и другие вяжущие с минеральными и органическими добавками; диагностика наноструктур и наноматериалов строительных систем; технологии исследования свойств наноматериалов; модифицирование строительных материалов нановолокнами; дисперсные композиционные материалы с нанопокрытием; формирование наноструктурных покрытий лазерным напылением; системы преподавания основ нанотехнологий; технологические принципы создания наноструктур (расплавы, золь-гелевый синтез и др.). Тематика статей может быть иной, прямо или косвенно связанной с перечисленными направлениями.

Журнал принимает к публикации: научные статьи, обзорные статьи, редакционные статьи, дискуссионные статьи, редакторские заметки, рецензии на книгу, рецензии на статью и т. п.

Структура статьи (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021)

НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (In English)
Original article (review article, editorial, discussion paper, individual bibliography, editorial notes, book reviews, paper reviews, etc.) (In English)
https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x

Заглавие статьи (In English)
Имя, первая буква отчества (при наличии), **фамилия автора** (-ов) (In English)
обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (In English)
(наименование организации (учреждения), где работает или учится автор, указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т.п.)
* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):
Фамилия и инициалы – https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

Abstract: независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (**Introduction, Methods and Materials, Results, Discussion, Conclusion**), компактными – укладываться в 200–250 слов) (на английском языке):
Abstract: Introduction… Methods and Materials… Results… Discussion…Conclusion…
Keywords: (In English) отделяют друг от друга запятыми, после последнего точку не ставят
Acknowledgments: (при наличии) (In English)
For citation: (In English)

Пример:
For citation: Nizin D.R., Nizina T.A., Spirin I.P., Chibulaev I.A., Pivkin N.A. The effect of the concentration of nanomodifiers and the moisture content of samples on the change in the properties of epoxy polymers. *Nanotechnologies in Construction*. 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

© authors, 2025

Статья ((In English) объем – 3–6 тыс. слов):
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSION**

References (In English) (согласно Vancouver Style).

Примеры:
1. Nizin D.R., Nizina T.A., Maryanova A.V., Mironov E.B. Moisture absorption of 3D-printed PETG plastic Samples. *Bulletin of MGSU*. 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. *Science*. 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature*. 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a

4. Mekeko N., Tikhonova E. Description of Author Contributions while Submitting a Manuscript: The CREDIT System. *Journal of Employment and Career.* 2022;1(4):5–7. (In Russ.) https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Примечание: 1. Названия журналов, книг и т.д. указываются курсивом. 2. В материалах, опубликованных только на русском языке, указывается (In Russ.)

Additional information (об использовании технологий генеративного искусственного интеллекта и технологий, основанных на искусственном интеллекте) (In English)

Примеры:
The authors declare that generative artificial intelligence technologies and technologies based on artificial intelligence were not used in the preparation of the article.
(Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте).
или
During the preparation of this article, [tool/service name] was used for [reason]. After using this tool/service, the content has been revised and edited as necessary, and I assume full responsibility for the content of the published article.
(Во время подготовки этой статьи был использован [название инструмента/сервиса] по [причине]. После использования этого инструмента/сервиса пересмотрен и отредактирован контент по мере необходимости, беру(ем) на себя полную ответственность за содержание опубликованной статьи).

Information about the author (authors) (In English)
– Имя, первая буква отчества (при наличии), фамилия автора;
– ученая степень;
– ученое звание;
– наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.);
– адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);
– электронный адрес автора (e-mail);
– открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).
Электронный адрес автора приводят без слова «e-mail», после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.
Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

Пример:
Zhanna V. Pisarenko – Dr. Sci. (Econ.), Assistant Professor, Saint-Petersburg State University, Economic Faculty, Department of Risk Management and Insurance, Saint-Petersburg, Russia, z.pisarenko@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0002-9082-2897

Contribution of the authors (In English):
Имя, первая буква отчества (при наличии) и фамилия автора; в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:
Marina S. Morozova – scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.
Elena V. Bokova – participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted XX.XX.202X; approved after reviewing XX.XX.202X; accepted for publication XX.XX.202X.

НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

НАЗВАНИЕ РУБРИКИ ИЛИ РАЗДЕЛА ЖУРНАЛА (на русском языке)
Научная статья (обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью и т. п.) (на русском языке) / (на английском языке)
УДК XXX
https://doi.org/10.15828/2075-8545-202X-x-x-x-x

Заглавие статьи (на русском языке)
Имя, отчество (при наличии), **фамилия автора** (-ов) (на русском языке)
обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (на русском языке)
(*наименование организации (учреждения), где работает или учится автор, указывается без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.*)
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: xxxxxxxxxx

ORCID автора (-ов):
Фамилия и инициалы – https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx

Аннотация (или **Резюме):** независимый от статьи источник информации, который позволяет ученым и специалистам сделать вывод о качестве и содержании статьи (резюме должны быть информационными, оригинальными, содержать новизну, основные результаты исследований, структурированными по IMRAD (введение, методы и материалы, результаты, обсуждение, заключение (выводы)), компактными – укладываться в 200–250 слов) (на русском языке):
Аннотация (или **Резюме): Введение… Методы и материалы… Результаты… Обсуждение… Заключение (выводы)…**
Ключевые слова: (на русском языке)
Благодарности: (при наличии) (на русском языке)
Для цитирования: (на русском языке)

> *Пример:*
> **Для цитирования:** Низин Д.Р., Низина Т.А., Спирин И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А. Влияние концентрации наномодификаторов и влагосодержания образцов на изменение свойств эпоксидных полимеров. *Нанотехнологии в строительстве.* 2024;16(6):499–509. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-499-509. – EDN: QGYFFZ.

Метаданные статьи (In English)
Заглавие статьи (In English)
Имя, первая буква отчества (при наличии), **фамилия автора** (-ов) (In English)
обязательное указание места работы каждого автора, город, страна (In English)
* Corresponding author: e-mail: xxxxxxxxxx
Abstract: Introduction… Methods and Materials… Results… Discussion…Conclusion… (In English)
Keywords: (In English)
Acknowledgments: (при наличии) (In English)
For citation: (In English)

© авторы, 2025

Статья (на русском языке, объем – 3–6 тыс. слов):
- **Введение**
- **Методы и материалы**
- **Результаты**
- **Обсуждение**
- **Заключение (выводы)**

Список источников (на языке оригинала статьи – русском или английском)

Пример:

1. Низин Д.Р., Низина Т.А., Марьянова А.В., Миронов Е.Б. Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика. *Вестник МГСУ.* 2023;18(7):1078–1088. https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.7
2. Venkatraman V. Conventions of Scientific Authorship. *Science.* 16 April 2010. Available at: https://www.science.org/content/article/conventions-scientific-authorship-0 (accessed: 13.05.2024).
3. Allen L., Scott J., Brand A., Hlava M., Altman M. Publishing: Credit where credit is due. *Nature.* 2014;508(7496):312–313. https://doi.org/10.1038/508312a
4. Мекеко Н. М., Тихонова Е. В. Описание авторского вклада при подаче рукописи: система CREDIT. *Журнал Работа и Карьера.* 2022;1(4):5–7. https://doi.org/10.56414/jeac.2022.24

Примечание: 1. Названия журналов, книг и т.д. указываются курсивом.

Дополнительная информация (об использовании технологий генеративного искусственного интеллекта и технологий, основанных на искусственном интеллекте) (на русском языке)

Примеры:

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

или

Во время подготовки этой статьи был использован [название инструмента/сервиса] по [причине]. После использования этого инструмента/сервиса пересмотрен и отредактирован контент по мере необходимости, беру(ем) на себя полную ответственность за содержание опубликованной статьи.

Информация об авторе (-ах) (на русском языке)

– фамилия, имя, отчество автора (полностью);
– ученая степень;
– ученое звание;
– наименование организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (без обозначения организационно-правовой формы юридического лица: ФГБУН, ФГБОУ ВО, ПАО, АО и т. п.);
– адрес организации (учреждения), ее подразделения, где работает или учится автор (город и страна);
– электронный адрес автора (e-mail);
– открытый идентификатор ученого (Open Researcher and Contributor ID – ORCID) (при наличии).

Электронный адрес автора приводят без слова «e-mail», после электронного адреса точку не ставят. ORCID приводят в форме электронного адреса в сети «Интернет». В конце ORCID точку не ставят. Наименование организации (учреждения), ее адрес, электронный адрес и ORCID автора отделяют друг от друга запятыми.

Редакция издания может расширить дополнительные сведения об авторе: указать его должность, почетные звания, членство в организациях и т. п.

Пример:

Писаренко Жанна Викторовна – доктор экономических наук, профессор кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия, z.pisarenko@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0002-9082-2897

Вклад авторов (на русском языке):

– фамилия, инициалы автора;
– в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Морозова М.С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.
Бокова Е.В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию XX.XX.202X; одобрена после рецензирования XX.XX.202X; принята к публикации XX.XX.202X.

Оформление текста рукописи

Формат
Редакция принимает тексты, сохраненные в программе Microsoft Word в формате .rtf.

Оформление
- используйте шрифт Times New Roman 14 пт и интервал 1,5 строки;
- не используйте подчеркивание внутри текста (для подзаголовков используйте полужирное начертание, для выделения в тексте – курсив);
- иностранные названия (журналов, организаций и т.д.) следует оставлять в оригинале, заключать в кавычки.

Аббревиатуры
Все аббревиатуры должны быть расшифрованы при первом употреблении. Если аббревиатур много, можно сделать список с расшифровкой каждой из них перед текстом статьи.

Таблицы и рисунки
Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и названы, на них должна быть отсылка в тексте статьи. В таблицах не должно быть пустых граф. Рисунки должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Прикладываются к статье отдельными файлами.
Чтобы проверить качество изображения, можно увеличить его. Хорошее изображение не размывается при увеличении.

Сноски
При необходимости используются сноски со сквозной нумерацией (арабские цифры) по всему документу. В сносках могут быть цитаты из работ, которые упоминаются в тексте, дополнительная информация.

Оформление цитат и списка литературы
В журнале принят Ванкуверский стиль цитирования (отсылка в тексте в квадратных скобках, полное библиографическое описание источника в списке литературы в порядке упоминания в тексте статьи).
Редакция рекомендует авторам при подготовке References учитывать политику цитирования, принятую в журнале.
Правильное описание используемых источников (References) не только демонстрирует качественный уровень исследования, но и является гарантией того, что цитируемая публикация будет учтена при оценке научной деятельности ее авторов. Международные индексирующие базы данных преобразуют все представленные ссылки по единой структуре. В связи с этим к этому блоку научной статьи предъявляются строгие требования унификации и стандартизации.
В журнале принят адаптированный вариант Ванкуверского стиля цитирования, который является одним из стандартов, признанных международными базами данных.

Список источников
В список литературы включаются источники, используемые в тексте статьи. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

Авторские права

Авторы, публикующиеся в журнале, соглашаются со следующим:
1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы.
2. Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном здесь виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикацию в книге), со ссылкой на ее оригинальную публикацию в этом журнале.
3. Авторы имеют право размещать их работу в сети Интернет (например, в институтском хранилище или на персональном сайте) до и во время процесса рассмотрения ее данным журналом, так как это может привести к продуктивному обсуждению и большему количеству ссылок на данную работу.

Приватность

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или предоставлены другим лицам и организациям.