ISSN 2075-8545 (online)
ASI • CA(pt) • CrossRef • 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 2022 • Tom 14 • No. 4
NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ научный Интернет-журнал 2022 • Том 14 • № 4

IN THE ISSUE:

В НОМЕРЕ:

- Effective use of dry foaming agents in the manufacture of foam gypsum thermal insulation nanocompositions
- Design and research of Nielsen arch bridge with fully composite structure system
- Modification of portland cement with nanoadditives
- Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction

- Эффективное использование сухих пенообразователей при изготовлении пеногипсовых теплоизоляционных нанокомпозиций
- Проектирование и исследование Арочного моста Нильсена с полностью композитной конструкционной системой
- Модификация тампонажного портландцемента нанодобавками
- Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования в гидротехническом строительстве

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)

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

ISSN 2075-8545 (online)

«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 can also publish: 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

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 № 4 (Vol. 14) is 30.08.2022

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 2022 • Vol. 14 • No. 4

NANOTEKHNOLOGII V STROITEL'STVE

CONTENTS

PUBLISHER INFORMATION 260

CONSTRUCTION MATERIAL SCIENCE
Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M.
Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II 263

APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION
Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Khalikov R.M., Solovyeva E.A., Nedoseko I.V.
Effective use of dry foaming agents in the manufacture of foam gypsum thermal insulation nanocompositions 274

THE STUDY OF THE PROPERTIES OF NANOMATERIALS
Luojin Cao, Nianqin Liu, Xiangyu Li, Wenming Que, Yong Li.
Design and research of Nielsen arch bridge with fully composite structure system 282

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS
Mazitova A.K., Zaripov I.I., Aminova G.K., Ovod M.V., Suntsova N.L.
Fillers for polymer composite materials 294

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL COOPERATION
Wuhan University of Technology 300

MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS
Moldamuratov Zh.N., Imambayeva R.S., Imambaev N.S., Iglikov A.A., Tattibayev S.Zh.
Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction 306

APPLICATION OF NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION
Agzamov F.A., Grigoryev A.Y.
Modification of portland cement with nanoadditives 319

THE STUDY OF THE PROPERTIES OF NANOMATERIALS
Xiangyu Li, Luojin Cao, Cheng Zhang, Liping Ma, Yong Li.
Three-Arch, Three-Cable Face Steel-Sided Main Girder Rigid Tie Composite Arch Bridge 328

PUBLISHING ETHICS 339

AUTHOR GUIDELINES 343

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.

Р Е Д А К Ц И Я

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

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, Института 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 № 4, Том 14, 2022: 30.08.2022 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 2022 • Том 14 • № 4

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСКИЕ СВЕДЕНИЯ 260

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А.М.
Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть II 263

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Халиков Р.М., Соловьева Е.А., Недосеко И.В.
Эффективное использование сухих пенообразователей при изготовлении пеногипсовых теплоизоляционных нанокомпозиций 274

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ
Луоджин Цао, Няньцин Лю, Сянюй Ли, Вэньмин Кве, Юн Ли.
Проектирование и исследование Арочного моста Нильсена с полностью композитной конструкционной системой 282

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ
Мазитова А.К., Зарипов И.И., Аминова Г.К., Овод М.В., Сунцова Н.Л.
Наполнители для полимерных композиционных материалов 294

МЕЖДУНАРОДНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО
Уханьский технологический университет 300

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ
Молдамуратов Ж.Н., Имамбаева Р.С., Имамбаев Н.С., Игликов А.А., Таттибаев С.Ж.
Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования в гидротехническом строительстве 306

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
Агзамов Ф.А., Григорьев А.Ю.
Модификация тампонажного портландцемента нанодобавками 319

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ
Сианунь Ли, Луоджин Цао, Чен Жан, Липин Ма, Юн Ли.
Трехарочный, трехканатный торцевой стальной балочный композитный арочный мост жесткого типа 328

ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА 339

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ 343

CONSTRUCTION MATERIAL SCIENCE

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-273

CC BY 4.0

Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II[1)]

Evgenij V. Korolev[1], **Anna N. Grishina**[2], **Aleksandr S. Inozemtcev**[2*], **Arkady M. Ayzenshtadt**[3]

[1] Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia
[2] Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
[3] Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

* Corresponding author: e-mail: InozemcevAS@mgsu.ru

ABSTRACT: Introduction. The study of the kinetics structure formation is rarely the subject of a careful study. Although it is important for materials used to create elements of building structures, energy elements, thermoelements and materials for other purposes. The article proposes refinements of the methodology for determining the parameters of the kinetics structure formation of cement composites, including modified compositions. **Methods and materials.** The structure formation of cement systems with plasticizers, microsized mineral additives (hydrosilicates of barium, copper, iron and zinc) and nanosized particles of zinc hydrosilicates has been studied. **Results and discussion.** It is proposed to single out two stages of initial structure formation: the stage of setting the cement paste and the stage of hardening. It was found that the strength of the material at the stage of hardening should be influenced by an additional factor, depending on the type of the introduced substance. A strong negative relationship between the parameters a and n of the equation $R(t) = R_{max}(1-e^{at^n})$ at the hardening stage was confirmed. The trends identified at the setting stage also demonstrated, namely: an increase in the rate of structure formation leading to the formation of a less dense structure. **Conclusions.** An analysis of the change in the value of the internal dimension of the system during the transition from the stage of setting to the stage of hardening made it possible to identify two trajectories of the system development. The first trajectory appears only by combining the elements of the structure (trajectory No. 1). Preservation of the characteristic dimensions of structural elements, but an increase in the proportion of elements with small dimensions (when the conditions that prevent the combination of elements of the structure are realized) describes the second trajectory (trajectory No. 2). The implementation of trajectory No. 2 is typical for compositions which the structure formation of cement stone is carried out in the presence of Melment F15G plasticizer or microsized particles of copper or zinc. For other studied compositions, structure formation is proceeding with the enlargement of structural elements.

KEYWORDS: cement binder, cement hydration, structure formation, plasticizer, hydrosilicate.

ACKNOWLEDGMENTS: This research was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWG-2020-0007, "Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety in the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats").

FOR CITATION: Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II. *Nanotechnologies in Construction.* 2022; 14(4): 263–273. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-274. – EDN: HDIVQU.

INTRODUCTION

Strength characteristics are important for building materials for various purposes. High requirements for these indicators are imposed on composites based on mineral and organic binders, on structural products manufactured in a monolithic, prefabricated or extrusion method [1–5]. In this case, the key factor is the chemical composition of the formed substances, which affects the strength of an individual bond in the structure. [6, 7]. The task of establishing the relationship between the number of crystallization centers, the chemical composition of

[1)] Ending. Part I was published in the journal Nanotechnologies in Construction. 2022. Vol. 14. No 3.

© Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M., 2022

the composite, the rate of formation of bonds between individual elements and the strength of the composite is of interest for mineral systems.

Early, the refinements of the methodology for determining the parameters of the kinetics structure formation of cement composites, including modified compositions, are proposed in the article [8]. The essence of the refinement is to consider the kinetics of structure formation as a time series, the development of which can be described by the dependence proposed by Hurst. After determining the Hurst exponent, the coefficient characterizing the rate of structure formation is refined.

It is proposed to single out two stages of initial structure formation: the stage of setting the cement paste and the stage of hardening. The selection of the setting stage is connected with the natural laws of the development of natural systems, namely, the initial formation of a structural grid obeys an exponential law. Moment of time when a deviation from this law is observed is the time of occurrence of spatial and/or prescription difficulties that hinder the exponential development of the system. A strong negative relationship between the parameters φ and β of the equation $H(t) = \alpha \exp(\varphi t^{\beta})$ has been established. These parameters characterize the rate of structure formation at the setting stage (parameter φ) and the density of the structure (parameter β or the internal dimension $D_{i,0}$ associated with it). The presence of such a negative relationship indicates the inadvisability of accelerating the processes of structure formation at the stage of setting. This is supported by a strong positive relationship between the period of initial structure formation $t_{0,s1}$ and the strength of the material R_{28}.

As shown earlier [9–13], the kinetic processes of structure formation obey the following equation:

$$y(t) = y_m\left(1 - e^{-\alpha t^n}\right), \quad (1)$$

where y_m is limiting value of the property characterizing the process of structure formation; α, n are coefficients. The coefficient α characterizes the rate of the process, and the coefficient n characterizes the geometric properties of the emerging structure.

The general equation of system development is an alternative to model (1) [7]:

$$\dot{x} = \left(\frac{k}{t^q}\right)x, \quad (2)$$

k is coefficient characterizing the rate of development of the system in time t; q is constant; x is quantity characterizing the property of the system.

Equation (2) shows:

- the rate of change in the "size" of the system depends on its size;
- the coefficient k/t^q, which characterizes the rate of increase in the size of the system, decreases with time.

When analyzing structure formation during the operational period x in equation (2) will characterize the number of destroyed (destructured) bonds.

The solution of differential equation (2) has the following form:

$$\ln(N) = \left(\frac{k}{1-q}\right)t^{1-q} + c_0, \quad (3)$$

N is number of connections.

Let us consider the features of cement compositions at the second stage of initial structure formation (at the stage of hardening).

METHODS AND MATERIALS

For cement materials, effective technological methods for controlling their structure formation are:

- use of plasticizers;
- introduction of mineral additives;
- use of nanoscale additives.

The following plasticizers were used: S3 (0.25–2.0 % by weight of Portland cement), Melflux 2651F based on polycarboxylate esters (0.10–1.00 % by weight of Portland cement); Melment F15G based on sodium sulfomelamin formaldehyde (0.50–1.50 % by weight of Portland cement). The study of the effect of plasticizing additives on the processes of cement stone structure formation was carried out on Portland cement compositions with a constant W/C = 0.25.

Microsized particles of barium, copper, iron or zinc hydrosilicates were used as mineral additives. Nanosized particles of zinc hydrosilicates were used as nanosized additives. The influence of nanosized particles on the structure formation of the cement material was carried out in the presence of microsized particles of barium hydrosilicates, the content of which was constant and amounted to 10% by weight of Portland cement. To create a composite binder, microsized barium hydrosilicates were introduced into Portland cement in an amount of 10% by weight of cement, zinc hydrosilicates in an amount of 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 and 6.0% , copper hydrosilicates in the amount of 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00% or iron hydrosilicates in the amount of 1.0, 2.0, 3.0 and 5.0% by weight of cement. These modifiers were synthesized using the technology of hydrochemical synthesis from sodium hydrosilicates and aqueous solutions of salts (copper and barium chloride, as well as zinc and iron sulfate). For the synthesis of metal hydrosilicates, a solution of sodium hydrosilicates with silicate modulus M_{Si} = 3,0; ω = 26,5% and salt solutions with concentrations $C(ZnSO_4)$ = 12%; $C(CuCl_2)$ = 15%; $C(BaCl_2)$ = 9,5%, $C(Fe_2(SO_4)_3)$ = 10,0% were used. The synthesis was carried out by adding a salt solution ($ZnSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$, $CuCl_2$ or $BaCl_2$) to a solution of sodium hydrosilicates at a ratio of $MeO(Me_2O_3)/SiO_2$ = 1,0. The

resulting precipitate was thoroughly washed by distilled water, dried at a temperature of 100–105°C and grinded. The average particle diameter of the obtained modifiers was 5–7 μm. The chemical composition of the modifying additive based on barium hydrosilicates additionally contains a small amount of barium carbonates formed during the carbonization of a barium salt as a result of mixing during synthesis. The modifying additive based on zinc hydrosilicates additionally contains a small amount of $Zn_4SO_4(OH)_6 \cdot xH_2O$. For the nanomodification of the binder nanosized zinc hydrosilicates produced according to the technology presented in [8] were used. Modifier have sedimentation stability [9]. The value of α_s is the ratio of the concentration of sodium cations to the concentration of chloride anions during the synthesis of the nanomodifier. The gross formulas of the applied nanomodifiers are given in Table 1.

The concentrations of the used nanomodifiers are presented in Table 2.

The average particle size is presented in Table 3.

Cement, barium hydrosilicates in an amount of 10% by weight of cement, and zinc, iron or copper hydrosilicates were thoroughly mixed until homogeneous. Cement paste with W/C = 0.32–0.325 was made from such a complex binder and samples were moulded. After that samples were stored in a normal curing chamber. Determination of the chemical composition of the samples was carried out on the 1st, 3rd, 7th, 14th and 28th days of hardening. After the strength test, the samples were grinded, and then the hydration of the binder was stopped by microwave method.

RESULTS AND DISCUSSION

Typical kinetic dependences of the structure formation of cement materials at the setting stage and at the hardening stage are shown in Fig. 1.

The parameters of equations (1) and (2), obtained from the results of processing experimental data, are presented in Tables 4.

Table 1
Chemical brutto-formula of zinc hydrosilicates

α_s	Concentration $Fe(OH)_3$, %		
	0.3	**0.5**	**0.7**
0.5	$ZnO \cdot 2.35SiO_2 \cdot nH_2O$	$ZnO \cdot 3.92SiO_2 \cdot nH_2O$	$ZnO \cdot 5.49SiO_2 \cdot nH_2O$
1.0	$ZnO \cdot 4.70SiO_2 \cdot nH_2O$	$ZnO \cdot 7.84SiO_2 \cdot nH_2O$	$ZnO \cdot 10.97SiO_2 \cdot nH_2O$
1.5	$ZnO \cdot 7.05SiO_2 \cdot nH_2O$	$ZnO \cdot 11.76SiO_2 \cdot nH_2O$	$ZnO \cdot 16.46SiO_2 \cdot nH_2O$

Table 2
Concentration of nanoscale zinc hydrosilicates, %

α_s	Concentration $Fe(OH)_3$, %		
	0.3	**0.5**	**0.7**
0.5	0.0282	0.0410	0.0539
1.0	0.0474	0.0732	0.0989
1.5	0.0667	0.1053	0.1438

Table 3
Average particle diameter, nm

α_s	Concentration $Fe(OH)_3$, %		
	0.3	**0.5**	**0.7**
0.5	13.3	12.9	14.7
1.0	11.3	15.8	21.0
1.5	13.1	20.8	29.7

Table 4
The results of processing experimental data obtained at the stage of hardening of cement materials

No	Concentration (%) / composition of additive	Equation Options $R(t) = R_{max}(1 - \exp(-\alpha t^n)$			D_i	r_1 (MPa)
		R_{max}	α	N		
1	2	3	4	5	6	7
Plasticizer variation						
1	Control composition	124.5	0.565	0.740	2.48	168.3
Plasticizer Melflux 2651F						
2	0.10	121.2	0.535	0.736	2.47	164.6
3	0.25	128.0	0.543	0.753	2.51	169.9
4	0.40	110.6	0.614	0.742	2.48	149.1
5	0.50	118.0	0.579	0.757	2.51	155.9
6	1.00	121.2	0.535	0.736	2.47	164.6
Plasticizer S3						
7	0.25	0.25	98.6	0.835	0.799	2.60
8	0.50	0.50	102.5	0.720	0.760	2.52
9	0.75	0.75	106.9	0.690	0.759	2.52
10	1.00	1.00	109.9	0.635	0.853	2.71
11	2.00	2.00	108.7	0.720	0.728	2.46
Plasticizer Melment F15G						
12	0.50	0.50	124.6	0.285	0.837	2.67
13	0.75	0.75	118.7	0.365	0.816	2.63
14	1.00	1.00	107.0	0.295	0.830	2.66
15	1.25	1.25	103.9	0.335	0.838	2.68
16	1.50	1.50	100.5	0.325	0.865	2.73
Variation of microsized particles of metal hydrosilicates						
17	Control composition	72.0	0.935	0.776	2.551	92.8
Microsized particles of copper hydrosilicates + 10% particles of barium hydrosilicates						
18	0.25	69.9	0.248	0.905	2.81	77.2
19	0.50	71.5	0.176	0.955	2.91	74.9
20	0.75	50.0	0.271	0.901	2.80	55.5
21	1.00	44.3	0.267	0.901	2.80	49.1
Microsized zinc hydrosilicate particles + 10% barium hydrosilicate particles						
22	0.50	80.9	0.323	0.865	2.73	93.5
23	1.00	76.6	0.315	0.862	2.72	88.9
24	2.00	78.5	0.275	0.889	2.78	88.3
25	3.00	78.7	0.248	0.897	2.79	87.7
26	4.00	82.2	0.229	0.897	2.79	91.6
27	5.00	44.2	0.520	0.752	2.50	58.8
28	6.00	47.5	0.320	0.825	2.65	57.6

1	2	3	4	5	6	7
Microsized particles of iron hydrosilicates + 10% particles of barium hydrosilicates						
29	1.00	65.9	0.595	0.740	2.48	89.0
30	2.00	52.7	0.525	0.758	2.52	69.5
31	3.00	54.6	0.263	0.870	2.74	62.7
32	5.00	52.4	0.675	0.723	2.45	72.5
Nano-sized particles of zinc hydrosilicates + 10% micro-sized particles of barium hydrosilicates						
33	$C(Fe(OH)_3) = 0.3\%$	α_s=0.5	40.8	0.555	0.776	2.55
34		α_s=1.0	47.7	0.421	0.821	2.64
35		α_s=1.5	44.9	0.408	0.827	2.65
36	$C(Fe(OH)_3) = 0.5\%$	α_s=0.5	42.2	0.571	0.771	2.54
37		α_s=1.0	49.2	0.388	0.835	2.67
38		α_s=1.5	44.1	0.425	0.790	2.58
39	$C(Fe(OH)_3) = 0.7\%$	α_s=0.5	45.4	0.507	0.791	2.58
40		α_s=1.0	53.9	0.371	0.844	2.69
41		α_s=1.5	52.8	0.408	0.827	2.65
Nanosized zinc hydrosilicate particles + 10% microsized barium hydrosilicate particles + 2% microsized zinc hydrosilicate particles						
42	$C(Fe(OH)_3) = 0.3\%$	α_s=0.5	40.6	0.289	0.859	2.72
43		α_s=1.0	68.2	0.361	0.832	2.66
44		α_s=1.5	40.6	0.309	0.871	2.74
45	$C(Fe(OH)_3) = 0.5\%$	α_s=0.5	58.7	0.361	0.847	2.69
46		α_s=1.0	52.7	0.424	0.821	2.64
47		α_s=1.5	54.8	0.405	0.828	2.66
48	$C(Fe(OH)_3) = 0.7\%$	α_s=0.5	51.3	0.311	0.870	2.74
49		α_s=1.0	54.4	0.300	0.875	2.75
50		α_s=1.5	42.4	0.369	0.843	2.69

Note. r_1 – strength of a single element of the structure.

This period of initial structure formation is characterized by a classical asymptotic dependence (Fig. 1, *c* and *d*). The values of the correlation coefficients for the data of Table 4 are presented in Table 5, from which it follows:

- there is a high correlation between the parameters α and n of the equation of kinetics of structure formation (1); the trends identified during the setting stage are also shown, namely: an increase in the rate of structure formation leads to the formation of a less dense structure;
- between the parameters α and n of the equation of the kinetics of structure formation (1) there is only a weak connection with the maximum strength of the material. The use of a complex variable that includes the indicated parameters of equation (1) insignificantly increases the correlation coefficient.

The absence of a significant relationship between the parameters of equation (1) and the strength of the material indicates the presence of additional parameters that characterize the elements that make up the structure of the material. It is obvious that a qualitative average estimate of the elements of the structure can be obtained using the parameters R_{max} (characterizes the maximum strength of the material) and the parameter n (characterizes the density of the material structure):

$$r_1 = R_{max} / n, \quad (4)$$

r_1 is structure element strength.

It is natural to assume that such an additional factor for the considered material should be the mineralogical composition of the Portland cement hydration products.

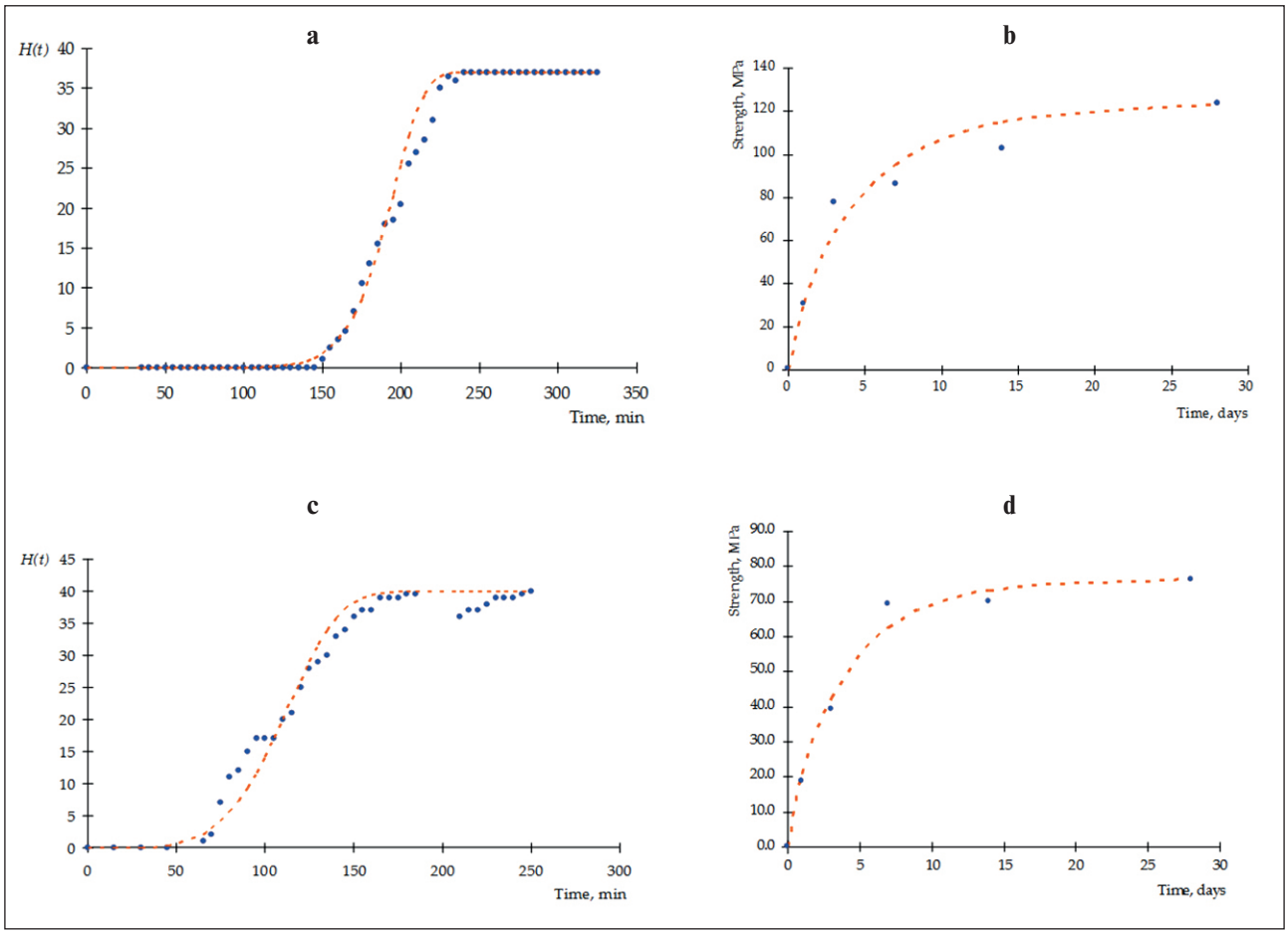

Fig. 1. **Experimental kinetic dependences of the structure formation of cement materials**: (a) and (b) for setting stage; (c) and (d) for curing stage; (a) and (c) in the presence of S3 plasticizer; (b) and (d) in the presence of microsized particles of zinc hydrosilicates

Table 5
Correlation table

Values of correlation coefficients *r* (for 50 compositions of Table 5)			
$\alpha \mid n$	$\alpha \mid R_{max}$	$n \mid R_{max}$	$\alpha/n \mid R_{max}$
–0.813	0.249	-0.248	0.263

Differential thermal analysis data (Table 6) were used for the specified analysis.

The following qualitative characteristics were used for the analysis:

- reduced value of anomaly № 2:

$$Q_2 = \frac{H_2}{H_1}\left|\sum H\right|, \quad (5)$$

- reduced value of anomaly № 3:

$$Q_3 = \frac{H_3}{H_1}\left|\sum H\right|, \quad (6)$$

- reduced value of anomalies № 2 и № 3:

$$Q_{23} = \frac{H_2 + H_3}{H_1}\left|\sum H\right|, \quad (7)$$

where ΣH is total enthalpy of anomalies; H_i is enthalpy of i-th anomaly.

In addition, the following coefficient was used to evaluate the change in internal dimension during the transition from the setting stage to the hardening stage:

$$\delta D_i = \frac{D_{i,0} - D_i}{D_{i,0}}, \quad (8)$$

Table 6
DTA results of cement stone and data analysis results

No	Enthalpy of anomalies (J/g)			$\lvert\Sigma H\rvert$ (J/g)	Reduced enthalpy of anomalies			δD_i (%)
	№1	№2	№3		№2	№3	№2+№3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Plasticizer variation								
1	-22.3	-54.7	-29.3	106.3	261.0	140.0	400.98	8.85
Plasticizer Melflux 2651F								
2	-16.7	-51.7	-52.1	120.5	371.9	375.2	747.12	9.41
3	-27.9	-50.2	-47.9	126.0	227.2	216.6	443.78	11.97
4	-16.9	-54.9	-35.5	107.3	348.3	225.0	573.23	6.97
5	-16.9	-55.6	-26.6	99.1	325.4	156.0	481.38	4.90
6	-23.2	-43.0	-45.9	112.1	208.1	222.4	430.44	5.12
Plasticizer S3								
7	-32.2	-48.9	-48.0	129.0	195.8	192.2	387.96	7.36
8	-29.9	-51.7	-44.9	126.4	218.7	190.1	408.79	8.30
9	-40.3	-47.3	-51.5	139.1	163.3	177.8	341.09	8.30
10	-95.2	-49.0	-48.7	192.8	99.2	98.6	197.81	5.80
11	-160.6	-49.8	-58.3	268.7	83.3	97.5	180.87	16.34
Plasticizer Melment F15G								
12	-22.2	-45.5	-48.8	116.5	239.1	256.7	495.75	1.33
13	-31.3	-40.5	-55.7	127.5	165.2	227.0	392.21	-0.49
14	-45.6	-42.9	-46.9	135.4	127.2	139.1	266.27	-1.36
15	-45.6	-39.1	-13.4	98.1	84.1	28.9	113.02	-3.31
16	-10.6	-3.7	-10.6	25.0	8.7	24.9	33.65	-5.09
Variation of microsized particles of metal hydrosilicates								
17	-19.8	-54.4	-28.5	102.8	282.5	148.2	430.72	7.11
Microsized particles of copper hydrosilicates + 10% particles of barium hydrosilicates								
18	-48.6	-43.2	-40.3	132.1	117.6	109.7	227.33	-0.08
19	-22.3	-48.2	-44.0	114.5	247.8	226.2	474.03	-3.42
20	-38.5	-45.4	-69.0	152.9	180.4	274.1	454.47	-13.51
21	-34.5	-25.0	-25.1	84.6	61.4	61.6	123.06	-5.28
Microsized particles of copper hydrosilicates + 10% particles of barium hydrosilicates								
22	-33.8	-41.0	-42.8	117.5	142.4	148.7	291.13	-1.65
23	-65.6	-37.6	-49.6	152.8	87.4	115.5	202.92	2.12
24	-26.9	-58.8	-49.5	135.2	295.7	249.0	544.65	-0.96
25	-59.4	-51.1	-56.0	166.5	143.4	157.1	300.47	-10.53
26	-131.0	-31.3	-41.5	203.7	48.7	64.5	113.18	-8.66
27	-39.0	-21.2	-29.2	89.4	48.5	67.0	115.50	7.11
28	-66.1	-15.2	-23.3	104.5	24.0	36.8	60.79	-1.85

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nano-sized particles of zinc hydrosilicates + 10% micro-sized particles of barium hydrosilicates								
33	-7.9	-41.5	-39.6	89.0	469.2	447.6	916.80	8.81
34	-13.1	-39.5	-38.0	90.6	272.8	263.0	535.80	5.35
35	-9.1	-45.5	-35.5	90.1	451.4	352.4	803.81	1.62
36	-8.6	-44.0	-28.4	80.9	414.7	267.7	682.37	-0.70
37	-15.2	-42.2	-38.6	96.0	266.8	244.2	511.03	6.60
38	-9.1	-45.5	-35.5	90.1	451.4	352.4	803.81	6.56
39	-8.8	-42.5	-35.5	86.8	420.7	351.5	772.15	8.39
40	-22.6	-41.5	-38.8	102.9	189.0	177.1	366.06	1.57
41	-13.1	-42,4	-38,7	94.2	306.1	279.2	585.22	4.01
Nanosized zinc hydrosilicate particles + 10% microsized barium hydrosilicate particles + 2% microsized zinc hydrosilicate particles								
42	-9.9	-31.9	-42.1	83.9	271.9	358.6	630.42	0.72
43	-72.2	-30.7	-33.4	136.3	58.0	63.0	121.07	1.14
44	-36.9	-35.4	-34.2	106.6	102.2	98.7	200.91	1.62
45	-39.8	-35.0	-30.3	105.1	92.6	80.0	172.59	3.65
46	-16.1	-32.1	-27.9	76.1	152.0	132.3	284.24	2.55
47	-21.0	-33.5	-28.9	83.4	133.1	115.0	248.11	4.57
48	-20.7	-35.1	-32.0	87.8	148.7	135.4	284.13	2.50
49	-24.6	-33.3	-31.7	89.7	121.5	115.6	237.10	1.59
50	-14.3	-31.6	-33.7	79.7	176.1	187.8	363.98	1.64

Note. The number of the composition is similar to the number of the composition in Table 4.

$|\Sigma H|$ is absolute total enthalpy of anomalies; δD_i is relative change in the internal dimension of the system.

In accordance with the definition of the fractal dimension [10], the sign in front of δD_i will indicate the trajectory along which the system developed:

- $\delta D_i > 0$ indicates an increase in the range of characteristic sizes of structure elements; there is a consistent increase in the size of the elements of the structure in the process of its evolution or transition from the setting stage to the hardening stage;
- $\delta D_i < 0$ indicates not a change in the characteristic dimensions of the elements of the system, but an increase in the relative number of elements with small dimensions; conditions that block the process of element enlargement are implemented in the system.

Analysis of Table 6 shows that the obtained data form two clusters in the coordinate system R_{max}–$|\Sigma H|$ (Figure 2). Moreover, one cluster is formed by data characterizing the effect of a plasticizer, and the other – the effect of particles of metal hydrosilicates.

The presented data clustering demonstrates the limited influence of the general fundamental regularities of the material structure parameters on its strength. That is, to achieve maximum strength, it is necessary to provide not only a high density of the structure, but also the presence of structural elements with high strength. Thus, the data of correlation table 7 demonstrate opposite trends in the influence of factors controlling structure formation: the introduction of plasticizers or the introduction of particles of metal hydrosilicates.

The relationship between the total enthalpy and the strength of the material is insignificant ($r < 0.3$) at the introduction of plasticizers and the relationship is high at the introduction of particles of metal hydrosilicates ($r > 0.7$). The same opposite trends are observed for individual anomalies. A noticeable positive relationship is observed for the second anomaly with the introduction of a plasticizer and a moderate negative relationship with the introduction of particles of metal hydrosilicates. At the same time, it should be noted that higher values of the correlation coefficient are observed when establishing relationship with the strength of the structural element. In addition, it follows from the presented data that the range of variation in the concentration of metal hydrosilicate particles should be refined.

An analysis of the dependence $n = f(\delta D_i)$ (Fig. 3) shows that the development path of the system depends on the type of input component. Values $\delta D_i < 0$ are typi-

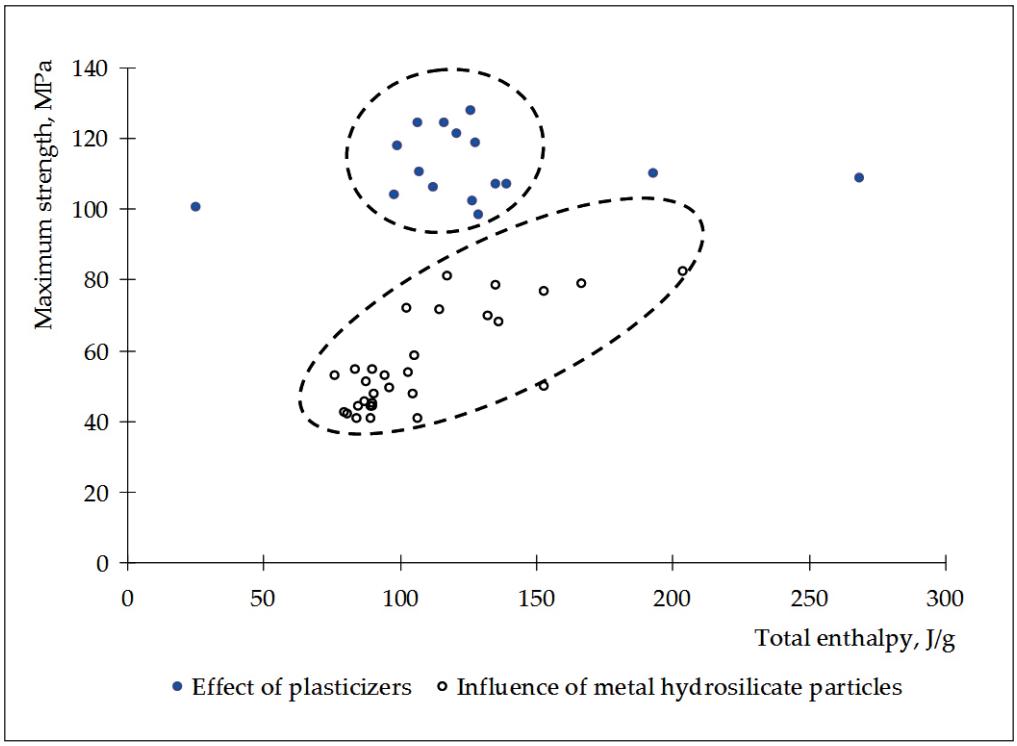

Fig. 2. **Dependence of the maximum strength of cement stone on the total enthalpy of Portland cement hydration processes in the presence of a plasticizer or particles of metal hydrosilicates**

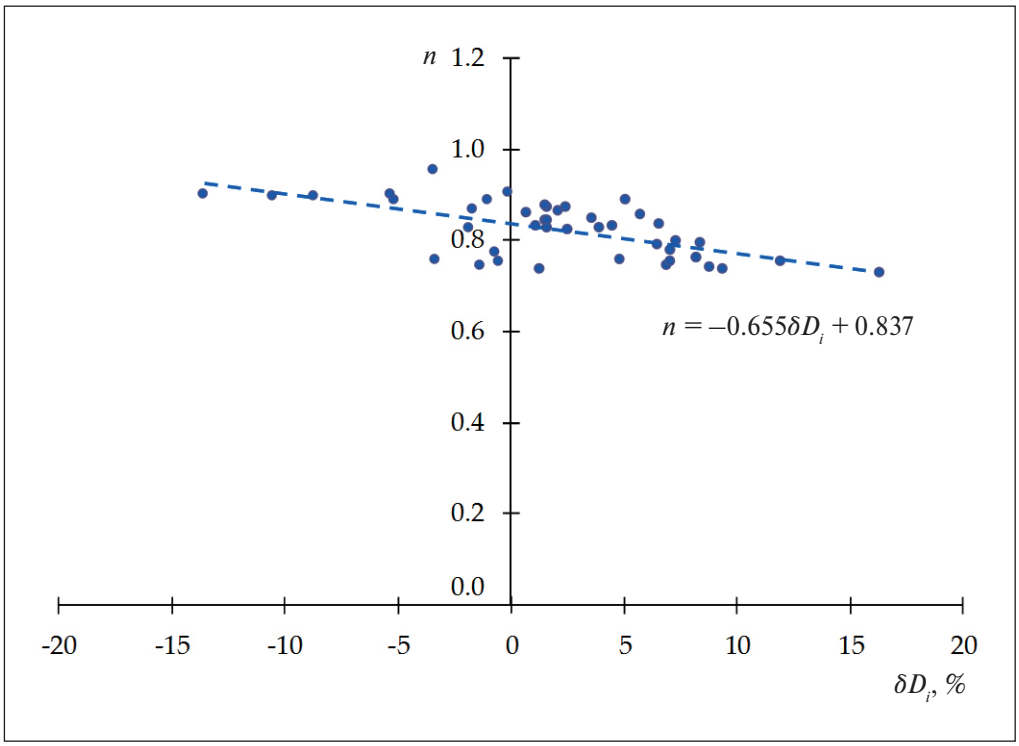

Fig. 3. **Dependence $n = f(\delta D_i)$**

Table 7
Correlation table

$\lvert\Sigma H\rvert \mid r_1$	$\lvert\Sigma H\rvert \mid R_{max}$	$Q_2 \mid r_1$	$Q_{23} \mid r_1$	$Q_{23} \mid r_1$	$Q_2 \mid R_{max}$	$Q_{23} \mid R_{max}$	$Q_{23} \mid R_{max}$
Effect of plasticizers							
0.165	0.023	0.654	0.501	0.617	0.540	0.497	0.550
Influence of metal hydrosilicate particles							
0.687	0.754	–0.277	–0.361	–0.321	–0.337	–0.378	–0.362

cal for cement systems with plasticizer Melment F15G or microsized particles of copper or zinc, for other systems the structure formation proceeds with the coarsening of the structural elements ($\delta D_i > 0$).

The presented data demonstrate that systems characterized by $\delta D_i < 0$ generally have a higher structure density, which is characterized by the parameter n (internal dimension of the system D_i).

CONCLUSIONS

In the structure formation of cement composites, it is proposed to distinguish two stages: the stage of setting the cement paste and the stage of hardening.

A strong negative relationship between the parameters α and n of the equation $R(t) = R_{max}(1-e^{\alpha t^n})$ at the hardening stage was confirmed. The trends identified at the setting stage are also demonstrated, namely: an increase in the rate of structure formation leads to the formation of a less dense structure. At the same time, it was found that the strength of the material at the stage of hardening should be influenced by the third factor (except for the rate of structure formation and structure density), which depends on the mineralogical composition of the cement stone. Analysis of data from the study of the mineralogical composition of cement stone by the method of differential thermal analysis shows that the effect of the influence of the third factor depends on the type of introduced substance. Moreover, opposite trends in the influence of plasticizers and particles of metal hydrosilicates have been established. This indicates the need to refine the range of variation in the concentration of metal hydrosilicate particles.

An analysis of the change in the value of the internal dimension of the system during the transition from the stage of setting to the stage of hardening made it possible to identify two trajectories of the development of the system. The first of them appears only by combining the elements of the structure (trajectory No. 1). Preservation of the characteristic dimensions of structural elements, but an increase in the proportion of elements with small dimensions (when the conditions that prevent the combination of elements of the structure are realized) describes the second trajectory (trajectory No. 2). The implementation of trajectory No. 2 is typical for compositions which the structure formation of cement stone is carried out in the presence of Melment F15G plasticizer or microsized particles of copper or zinc. For other studied compositions, structure formation proceeds with the enlargement of structural elements.

REFERENCES

1. Ahmed H, Bogas JA, Guedes M, Pereira MFC. Dispersion and reinforcement efficiency of carbon nanotubes in cementitious composites. *Magazine of Concrete Research*. 2018; 71(8): 408–423. Available from: https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00562

2. Aksenova VV, Alimbaev SA, Pavlov AV, Mustafin RM. Briquetting of Porous Alumina-Containing Materials Using Organic Binders. *Steel in Translation*. 2021; 51: 291–295. Available from: https://doi.org/10.3103/S0967091221050028 EDN: YOJBTG.

3. Duong TQ, Korolev EV, Inozemtcev AS. Selection of Reinforcing Fiber for High-strength Lightweight Concrete for 3D-Printing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030 (1): 012007. Available from: https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012007 EDN: GOANHN.

4. Kim M, Kim T, Kim H. Rheological analysis of physical states of cellulose nanocrystal suspension and synergetic effect of aligned gel state. *Carbohydrate Polymers*. 2022; 28415: 119170. Available from: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119170

5. Zhai Y, Tang Y, Li J, Duan L, Su C, Cao A, Jin C, Fang L. Structure, Raman spectra and properties of two low-εr microwave dielectric ceramics $Ca_3B_2Ge_3O_{12}$ (B = Al, Ga). *Ceramics International*. 2020; 46: 28710–28715. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.031

6. Maksimova I, Makridin N, Erofeev V, Barabanov D. Study of the Properties of Water-Hardened Cement Stone Depending on the Water-Cement Ratio and Age. *Proceedings of EECE 2020*. 2021; 192–203. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_20 EDN: ZRRRJI.

7. Maksimova IN, Erofeev VT, Makridin NI. Kinetic parameters of hydration structure formation and hardening of cement stone up to 9.5 years old after steaming. *News of universities. Construction*. 2018; 3: 24–33. Available from: https://elibrary.ru/item.asp?id=35250280 [Accessed 20th January 2022]. EDN: LWOJNZ.

8. Korolev EV, Grishina AN, Inozemtcev AS, Ayzenshtadt AM, Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part I. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(3): 176–189. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-176-189 EDN: CQSUQW.

9. Bobryshev AN. *Physics and synergetics of dispersed-disordered condensed composite systems* / AN Bobryshev, VT Erofeev, VN Kozomazov. SPb.: Science; 2012.

10. Bobryshev AN *Strength and durability of polymer composite materials* / A.N. Bobryshev, VN Kozomazov, AV Lakhno, VV Tuchkov. Lipetsk: Ulis; 2006.

11. Bobryshev AN, Kozomazov VN, Avdeev RI, Tumanova NN. Topological features of kinetic processes. *Condensed media and interfaces*. 2003; 5: 120–125.

12. Avdeev RI, Bobryshev AN, Tumanova NN. Models of evolutionary processes with linear mapping. *News of the Tula State University. Series: "Technology, mechanics and durability of building materials, structures and structures*. 2001; 2: 45–49.

13. Voronov PV, Bobryshev AN, Lakhno AV. Estimation of the kinetics of phase transitions in hardening heterogeneous materials. *Regional architecture and construction*. 2010; 2: 58–66. Available from: https://elibrary.ru/item.asp?id=15322265 [Accessed 21th January 2022]. EDN: MXHSSV.

14. Zhirmunsky AV. *Critical levels in the development of natural systems* / AV Zhirmunsky, VI Kuzmin. L.: Science; 1990.

15. Grishina AN, Korolev EV. Efficiency of Modifying Cement Composites with Nanosized Barium Hydrosilicates. *Building Materials*. 2015; 2: 72–76. Available from: https://elibrary.ru/item.asp?id=22992326 [Accessed 22th January 2022]. EDN: TJDREH.

16. Grishina AN, Korolev EV. Choice of Technology for the Synthesis of Nanosized Barium Hydrosilicates. *Nanotechnologies in construction*. 2013; 5: 111–119. Available from: https://elibrary.ru/item.asp?id=20355453 [Accessed 23th January 2022]. EDN: RDLKEJ.

17. Grinchenko VT. *A dozen lectures on fractals: From an object of admiration to a tool of knowledge* / VT Grinchenko, AA Matsypura, IV Snarsky, L Vovk. M.: LENAND; 2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgenij V. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice rector, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia, korolev@nocnt.ru, https://orcid.org/0000-0003-3600-812X

Anna N. Grishina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher at the Scientific and Educational Center Nanomaterials and Nanotechnologies, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, GrishinaAN@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0002-0137-7155

Aleksandr S. Inozemtcev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Researcher at the Scientific and Educational Center Nanomaterials and Nanotechnologies, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, InozemcevAS@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7807-688X

Arkady M. Ayzenshtadt – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Professor at the Department of Composite Materials and Building Ecology, Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia, a.isenshtadt@narfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2904-2549

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 06.05.2022; approved after reviewing 03.06.2022; accepted for publication 06.06.2022.

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья
УДК 691
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-273

CC BY 4.0

Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть II[1)]

Евгений Валерьевич Королев[1], **Анна Николаевна Гришина**[2], **Александр Сергеевич Иноземцев**[2*], **Аркадий Михайлович Айзенштадт**[3]

[1] Санкт-Петербургский университет архитектуры и строительства, Санкт-Петербург, Россия
[2] Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
[3] Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Исследование кинетики структурообразования редко является предметом тщательного изучения, хотя имеет важное значение для материалов, использующихся для создания элементов строительных конструкций, энергоэлементов, термоэлементов и материалов другого назначения. Для минеральных систем в кинетике структурообразования имеются зависимости между числом центров кристаллизации, химическим составом композита, скоростью формирования связей между отдельными элементами и формируемой прочностью композита, что позволяет по начальным параметрам гидратации предсказать эксплуатационные свойства получаемого искусственного камня. **Материалы и методы.** В работе осуществлено уточнение методики определения параметров уравнений, описывающих кинетику структурообразования цементных композитов, в том числе модифицированных различными соединениями. Исследовано структурообразование цементных систем с пластификатором (С3, Melflux 2651F и Melment F15G), микроразмерными минеральными добавками (гидросиликаты бария, меди, железа и цинка) и наноразмерными частицами гидросиликатов цинка. **Результаты и обсуждение.** Предложено выделять два этапа начального структурообразования: этап схватывания цементного теста и этап твердения. На этапе твердения также подтверждена сильная отрицательная корреляционная связь между параметрами a и n структурно-кинетического уравнения формирования структуры $y(t) = y_m(1-e^{-at^n})$, демонстрирующая те же тенденции, выявленные на стадии схватывания, а именно: увеличение скорости структурообразования приводит к формированию менее плотной структуры. Выявлено, что на этапе твердения на прочность материала должен оказывать влияние дополнительный фактор, зависящий от вида вводимого вещества. **Выводы.** Выделены две траектории развития систем: увеличение характерных размеров элементов структуры посредством объединения элементов структуры (траектория № 1) и увеличение доли элементов с малыми размерами при сохранении характерных размеров структурных элементов (траектория № 2). Первая из них характерна для большинства составов с исследуемыми добавками кроме составов с Melment F15G или микроразмерными частицами меди или цинка, где структурообразование протекает по второй траектории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементное вяжущее, гидратация цемента, структурообразование, пластификатор, гидросиликаты.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Проект № FSWG-2020-0007, «Теоретико-экспериментальные разработки новых композиционных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз»).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А.М. Исследование кинетики структурообразования цементных дисперсных систем. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 263–273. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-273. – EDN: HDIVQU.

[1)] Окончание. Часть I опубликована в журнале «Нанотехнологии в строительстве». 2022. Т. 14. № 3.

© Королев Е.В., Гришина А.Н., Иноземцев А.С., Айзенштадт А.М., 2022

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ahmed H., Bogas J.A., Guedes M., Pereira M.F.C. Dispersion and reinforcement efficiency of carbon nanotubes in cementitious composites. Magazine of Concrete Research. 2018; 71(8): 408–423. https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00562

2. Aksenova V.V., Alimbaev S.A., Pavlov A.V., Mustafin R.M. Briquetting of Porous Alumina-Containing Materials Using Organic Binders. Steel in Translation. 2021; 51: 291–295.

3. Duong T.Q., Korolev E.V., Inozemtcev A.S. Selection of Reinforcing Fiber for High-strength Lightweight Concrete for 3D-Printing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021; 1030 (1): 012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012007

4. Kim M., Kim T., Kim H. Rheological analysis of physical states of cellulose nanocrystal suspension and synergetic effect of aligned gel state. Carbohydrate Polymers. 2022; 28415: 119170. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119170

5. Zhai Y., Tang Y., Li J., Duan L., Su C., Cao A., Jin C., Fang L. Structure, Raman spectra and properties of two low-εr microwave dielectric ceramics $Ca_3B_2Ge_3O_{12}$ (B = Al, Ga). Ceramics International. 2020; 46: 28710–2871515. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.031

6. Maksimova I., Makridin N., Erofeev V., Barabanov D. Study of the Properties of Water-Hardened Cement Stone Depending on the Water-Cement Ratio and Age. Proceedings of EECE 2020. 2021; 192–203.

7. Максимова И.Н. Кинетические параметры гидратационного структурообразования и твердения цементного камня в возрасте до 9,5 лет после пропарки / И.Н. Максимова, В.Т. Ерофеев, Н.И. Макридин // Известия вузов. Строительство. 2018. Вып. 3. С. 24–33.

8. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M., Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part I. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(3): 176–189. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-176-189. – EDN: CQSUQW.

9. Бобрышев А.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем / А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев, В.Н. Козомазов. СПб.: Наука, 2012. 476 с.

10. Бобрышев А.Н. Прочность и долговечность полимерных композиционных материалов / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, А.В. Лахно, В.В. Тучков. Липецк: РПГФ «Юлис», 2006. 170 с.

11. Бобрышев А.Н. Топологические особенности кинетических процессов / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Р.И. Авдеев, Н.Н. Туманова // Конденсированные среды и межфазные границы. 2003. вып. 2 (5). С. 120–125.

12. Авдеев Р.И. Модели эволюционных процессов с линейным отображением / Р.И. Авдеев, А.Н. Бобрышев, Н.Н. Туманова // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технология, механика и долговечность строительных материалов, конструкций и сооружений». 2001. Вып. 2. С. 45–49.

13. Воронов П.В. Оценка кинетики фазовых переходов в твердеющих гетерогенных материалах / П.В. Воронов, А.Н. Бобрышев, А.В. Лахно // Региональная архитектура и строительство. 2010. Вып. 2. С. 58–66.

14. Жирмунский А.В. Критические уровни в развитии природных систем / А.В. Жирмунский, В.И. Кузьмин. Л.: Наука, 1990. 223 с.

15. Гришина А.Н. Эффективность модифицирования цементных композитов наноразмерными гидросиликатами бария / А.Н. Гришина, Е.В. Королёв // Строительные материалы. 2015. Вып. 2. С. 72–76.

16. Гришина А.Н. Выбор технологии синтеза наноразмерных гидросиликатов бария / А.Н. Гришина, Е.В. Королев // Нанотехнологии в строительстве. 2013. Вып. 4 (5). С. 111–119.

17. Гринченко В.Т. Дюжина лекций о фракталах: от объекта восхищения к инструменту познания / В.Т. Гринченко, В.Т. Мацыпура, А.А. Снарский, И.В. Вовк. – М.: ЛЕНАНД, 2020. 266 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Королев Евгений Валерьевич – доктор технических наук, профессор, проректор, Санкт-Петербургский университет архитектуры и строительства, Санкт-Петербург, Россия, korolev@nocnt.ru, https://orcid.org/0000-0003-3600-812X

Гришина Анна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнолоогии», Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, GrishinaAN@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0002-0137-7155

Иноземцев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, InozemcevAS@mgsu.ru, https://orcid.org/0000-0001-7807-688X

Айзенштадт Аркадий Михайлович – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры композитных материалов и экологии строительства, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, a.isenshtadt@narfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2904-2549

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы внесли равный вклад в эту статью.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.05.2022; одобрена после рецензирования 03.06.2022; принята к публикации 06.06.2022.

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-274-281

CC BY 4.0

Effective use of dry foaming agents in the manufacture of foam gypsum thermal insulation nanocompositions

Ruslan I. Shigapov[1], **Dmitry A. Sinitsin**[1], **Rauf M. Khalikov**[1]*, **Elena A. Solovyeva**[2], **Igor V. Nedoseko**[1]

[1] Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

[2] Moscow State University of Technology and Management, Moscow, Russia

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

ABSTRACT: Introduction. The elaboration of foamed eco-friendly gypsum nanocomposites with low specific gravity, high thermal insulation, operational and technical and economic characteristics remains an urgent task. Controlled hardening of gypsum foam nanoassemblers using dry foaming agents is a promising direction in the technology of production of heat-insulating building materials. **Methods and materials.** The production of a foam gypsum composition was carried out in an ejector-turbulent mixer by mixing a gypsum nanobinder with functional foaming nanoadditives. Building gypsum G5 BII was used as a binder in the work; porization of gypsum compositions was carried out using an adsorbed foaming agent PBNS. **Results.** The transformation of liquid-phase foaming agents into solid-phase ones by binding water allows the production of gypsum foam compositions from dry mixtures, which gives high dosing accuracy, a good degree of homogenization of components and stable characteristics of foamed gypsum nanocompositions. In production conditions, a one-storey small-sized pavilion was built using a pilot 3D printer AMT S1160, in which vertical enclosing structures are filled with foamed heat-insulating nanostructured foam gypsum. Monolithic foam gypsum nanomaterial with a density of 300–400 kg/m^3 was used for insulation and sound insulation of attic floors during the overhaul of the historic building of the Veterans Hospital in Ufa. **Discussion.** The elaboration of technology for obtaining foam gypsum from dry mixtures is based on the advantage of manufacturing and using thermal insulation nanocompositions, which allows for significant punctuality of dosing and stable characteristics of foam gypsum building materials. Surfactants have a significant effect on the kinetics of the structure formation of the foam gypsum nanocomposition and slow down the coalescence of air bubbles. **Conclusions.** Nanoporous foam gypsum concrete, obtained as a result of controlled hardening, with a density of 400 kg/m^3 has a thermal conductivity of 0.12 W/(m•ºC) and a compressive strength of 1.4 MPa. The compressive strength of foamed foam gypsum using a dry foaming agent on sorbents is 17% higher than the strength of a heat-insulating nanomaterial prepared using traditional technology.

KEYWORDS: foam gypsum nanomaterials, foaming agents, structure formation of foam gypsum, hardening of nanocomposite.

FOR CITATION: Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Khalikov R.M., Solovyeva E.A., Nedoseko I.V. Effective use of dry foaming agents in the manufacture of foam gypsum thermal insulation nanocompositions. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(4): 274–281. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-274-281. – EDN: JCWFCQ.

INTRODUCTION

As part of the implementation of the national project of the Russian Federation "Housing and urban environment", modern building materials of nanoporous structure are widely used for the construction of individual residential low-rise buildings [1–5]. The elaboration of foamed nanocomposite eco-friendly gypsum binders with sufficiently significant strength, low specific gravity, high thermal insulation and frost-resistant properties, ensuring the production of 3D structures with demanded operational and technical and economic characteristics, remains an urgent task.

The purpose of this article is to study the production of foam gypsum nanomaterials using effective foaming agents based on the raw materials of Bashkortostan for the construction of low–rise buildings.

METHODS AND MATERIALS

The preparation of a foamed gypsum nanocomposition was carried out by mixing a gypsum binder with the introduced functional nanoadditives, including a dry

© Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Khalikov R.M., Solovyeva E.A., Nedoseko I.V., 2022

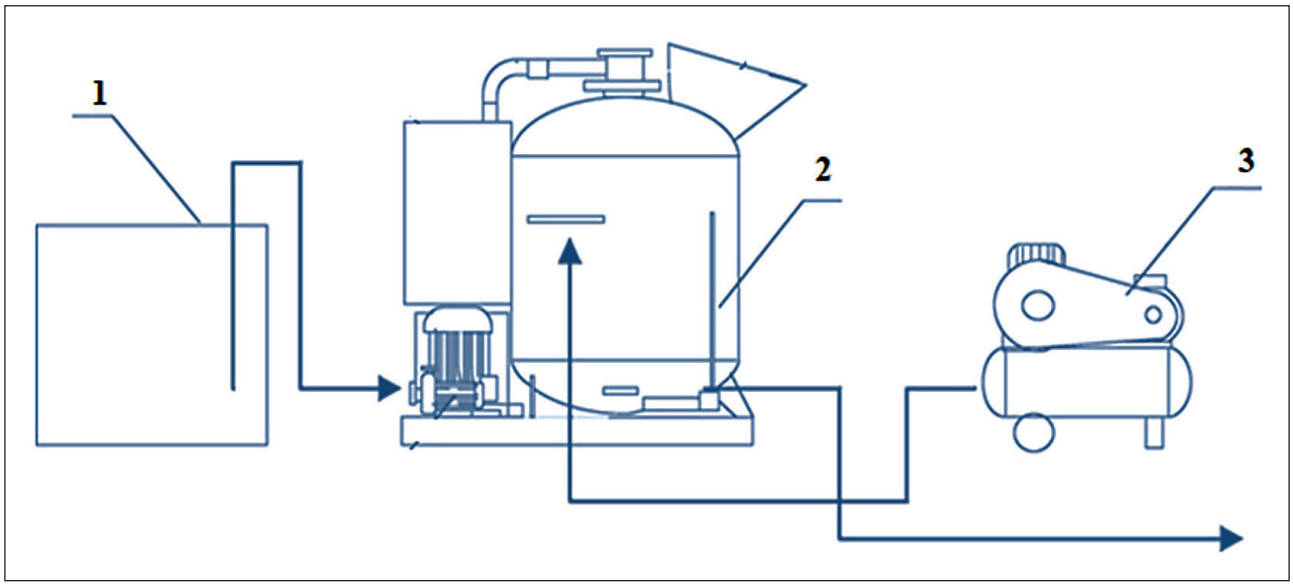

Fig. 1. **Technological scheme of production of foam gypsum nanocomposition:** 1 – storage reservoir; 2 – ejector-turbulent mixer; 3 – ejector compressor

foaming agent and water at the installation – ejector-turbulent mixer ETS-0.5 (Weft company) (Fig. 1).

The method of production of heat-insulating foam gypsum is based on one-stage mixing for 6-8 minutes of a dosed amount of gypsum composite nano-binder and water from a storage reservoir. The mixer ETS-0.5 is equipped with a flow-through electronic sensor for monitoring the water level of the closure and a time relay for monitoring the phase of active porization of the nanogypsum composition. Metered volumes of air, which are supplied by the compressor through an ejector built into the mixer, provides bubbling and intensive foaming, cavitation of gypsum nanocomposition. The capacity of the ETS mixer is 0.5 to 5 m^3/hour, with the supply of nanocomposite foam gypsum through hoses at a pressure of 0.2–2.5 MPa up to 30 meters horizontally and up to 15 meters vertically.

To measure the thermal conductivity coefficient of foam gypsum samples with dimensions of 250•250•50 mm, the ITP-MG4 "100" device was used: the test range is 0.03–1 W / (m•°C), the limit of the relative error in determining the thermal conductivity coefficient is ± 7. The determination of the thermal conductivity of a foam gypsum sample provides for the creation of a constant heat flow through the sample at a fixed temperature difference on its surfaces [6].

Building gypsum G-5BII (Ufa Gypsum Company) was used as a nano-binder in the work. To regulate the kinetics of hardening (slowing down the setting time) of the gypsum foam mixture, nano–additives – setting retarders were used: Plast Retard PE (firm "Retardan", Italy) 0.05% by weight of the gypsum binder. Various hardening retarders provide a controlled decrease in the dissolution rate of gypsum semihydrate, therefore, reduce the concentration of calcium sulfate dihydrate crystallohydrates precipitating into an undesirable precipitate [7, 8].

Foaming porization of gypsum compositions was carried out using a dry (adsorbed with expanded clay sand) PBNS foaming agent with stabilizing nanoadditives ("Plant Technochemsynhtes", Ufa), which provides the necessary air extraction (foam multiplicity of at least 5) and the viability of three-phase foam. The PBNS foaming agent has the following chemical structure: a hydrocarbon chain C_{10-19} (hydrophobic fragment) and a hydrophilic functional group.

Concentrated aqueous solutions of the PBNS foaming agent were converted into a dry solid-phase state by the method of joint mixing with expanded clay sand. The stability of the dry foaming agent on the adsorbent is explained by the fact that the microparticles of the expanded clay sorbent are positively charged, and the hydrophilic part of the foaming agent molecule is negatively charged. The adsorbed foaming agent with the sorbent was dried at a temperature of 20–150°C to a humidity of 5%; then the dried PBNS foaming agent was crushed and added (the optimal concentration of 0.25%) to a dry building gypsum mixture. The elaboration of technology for obtaining foam gypsum from dry mixes is based on the advantage of manufacturing and using dry mixes: high dosing accuracy, a good degree of homogenization of components and stable characteristics of foam gypsum nanomaterials [9, 10].

During adsorption on the surface of air bubbles (Fig. 2), the hydrophobic hydrocarbon part of the foaming agent molecules are arranged in a monomolecular layer in the gas phase, forming a 2.5–3 nm diffinyl layer.

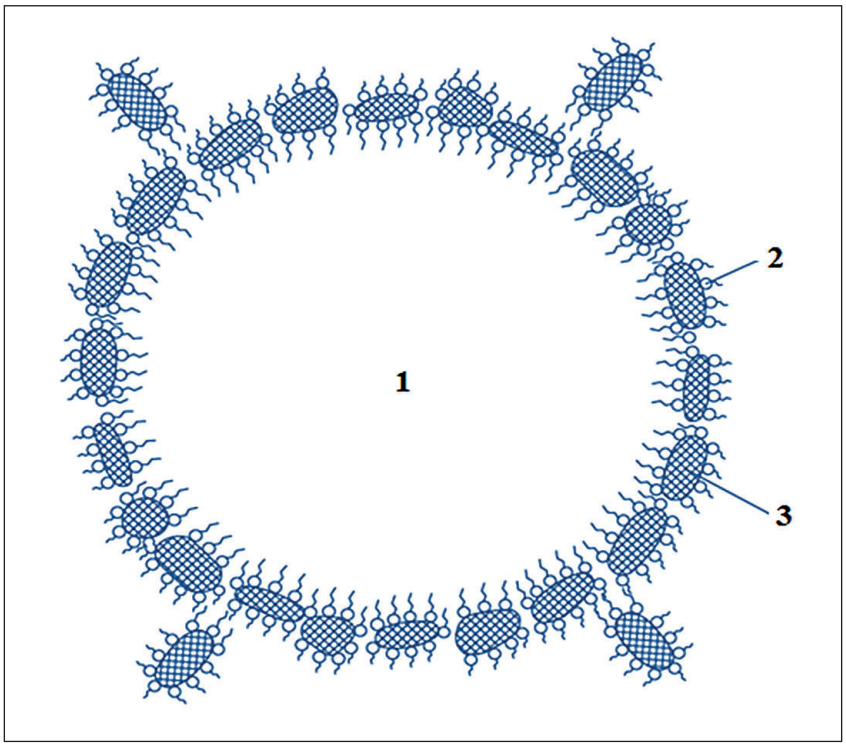

Fig. 2. **Scheme of adsorption of foaming agent molecules on the surface of foam gypsum air bubbles:** 1 – gas phase; 2 – monomolecular layer of foaming agent; 3 – gypsum crystallohydrates

Local micro-heterogeneities and germinal calcium sulfate dihydrate nanoclusters crystallohydrates with sizes of ≈ 20–70 nm [11] lead to variations in the thickness of the molecular layer of the foaming agent in the nanogypsum foam composition. Further strengthening of the primary nanostructure occurs due to an increase in the number of nanocontacts between unrelated growing gypsum microcrystals.

The consumption of dry foaming agent in the manufacture of foam gypsum thermal insulation nanocompositions is 1.7–2.8 kg per 1 m^3 of foamed mixtures, which is proportional to the consumption of liquid-phase foaming agent. Foam multiplicity is not less than 7.0; foam stability is not less than 360 seconds. The optimal formation of a foamed gypsum structure also depends on the ratio of water and gypsum nano-binder; in addition, the hydrochemical quality of the water component should be noted. Increased water hardness leads to overspending of the foaming agent, therefore reliable quality management of the functioning of the technological water supply line is necessary.

The density and compressive strength of foam gypsum samples were determined according to GOST 17177-94 "Materials and products for building thermal insulation. Test methods", GOST EN 1602-2011 "Thermal insulation products used in construction. Method for determining apparent density", GOST 125-2018 "Gypsum binders. Technical conditions". A stereoscopic method for studying the shapes and sizes of micropores of foam gypsum samples was performed using a Nicon SMZ 1500 optical microscope.

RESULTS

Optimal porization of gypsum nanocompositional materials is associated with significant difficulties due to the short setting time of the nano-binder; the introduction of a modified PBNS foaming agent optimizes the kinetics of hardening. In the process of foaming, the hydrophilic-oriented molecules of the foaming agent create an adsorption layer on the hydrated layers of gypsum nanoassemblers, sharply slow down the fusion (coalescence) of air bubbles, preserve the nanosuspension for a sufficiently long time in a colloidal state. The use of surface-active molecules of the PBNS foaming agent ensures the involvement of the necessary volume of micro-bubbles of air in the production of foam gypsum nanosuspension.

The addition of a gypsum binder foam agent PBNS concentration of 0.1–0.2% leads to a decrease in the water gypsum ratio. The study of the technological parameters of foaming made it possible to determine the conditions of the kinetic stability of the foam: a decrease in the angular velocity of mixing the foam causes thinning of the interstitial partitions of the foam gypsum with the formation of through porosity. The set of structural strength with foam gypsum concrete takes from two to three hours. The com-

pressive strength of foamed foam gypsum with a density of 400 kg/m^3, prepared using a dry foaming agent PBNS (on sorbent), is 17% greater than the strength of the thermal insulation material made using classical technology with the same foaming agent in the form of an aqueous solution. It is established that the optimal production of closed porosity of nanostructured foam gypsum (Fig. 3) is provided under the condition that the foam dispersion rate and the mixing rate do not change.

It should be noted that the use of only prefabricated blocks and slabs based on light, cellular concrete or foam ceramics with the best thermal efficiency indicators for objective reasons cannot satisfy all the needs of the construction industry in structural and thermal insulation building materials. In particular, in the conditions of major repairs and restoration of architectural heritage objects, only monolithic methods of construction work are possible. The choice of structural and thermal insulation materials for monolithic technologies presented on the construction market is in reality small and is practically limited only to the use of expanded clay backfills and expanded clay concrete of various densities in screeds under floors and for the deconstruction of flat low-slope roofs.

Nanostructured foam gypsum is the most popular and promising building material for the monolithic method of production of construction and installation works and the use of structural and thermal insulation composites. Comprehensive studies of thermal insulation and sound insulation characteristics of nanostructured foam gypsum obtained using monolithic technology (Table 1) have confirmed its sufficiently high technological characteristics.

Monolithic foam gypsum nanomaterial was used to insulate attic floors during the overhaul of the Veterans Hospital building in Ufa to replace the slag filling that had become unusable, as well as a sound-proofing and fire-retardant building material of the interstory floor. The practical effectiveness of using nanostructured monolithic foam gypsum in attic and interstory floors is as follows:

– nanocomposite foam gypsum (density 300–400 kg/m^3) is much lighter than slag backfill (density 900–1100 kg/m^3), and its use in floors has significantly lightened the weight of the floor and reduced the load on the main load-bearing structures of the historic building (walls and foundations), which for almost 1.5 centuries of operation have received significant physical wear;
– monolithic nanofoam gypsum provides both sufficient sound insulation of interstory floors and fire protection of existing steel beams without additional treatment with very expensive flame retardant swelling paint compositions;
– it is especially important in the production of repair and restoration works to fill with monolithic nanocomposite foam gypsum, which allows you to meet almost any requirements for geometric characteristics; in particular, during the overhaul of the building of the Hospital of War Veterans after the dismantling of old building structures: boardwalk, wooden beams and slag filling, it turned out that the steel main beams of

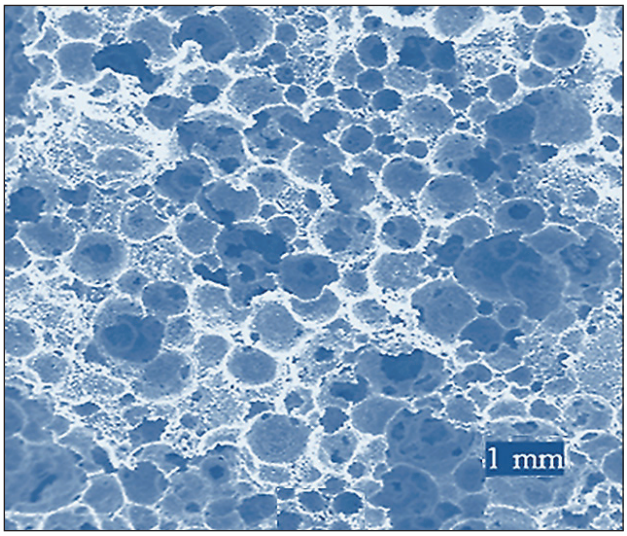

Fig. 3. **Microstructure of nanostructured foam gypsum with a density of 400 kg/m^3**

Table 1
Physico-mechanical and thermal characteristics of nanocomposite foam gypsum

No.	The name of the indicator	Average values of the indicator	
1	Density, kg/m^3	300	400
2	Thermal conductivity in the dry state at t = 25°C, W/(m•°C)	0.10	0.12
3	Calculated characteristics of thermal conductivity, W/(m•°C): – under operating conditions of construction “A”, – under operating conditions of construction “B”	 0.14 0.23	 0.17 0.26
4	Vapor permeability, mg/(m•h•Pa)	0.28	0.25
5	Compressive strength, MPa	1.1	1.4

the floor-to-floor overlap have different heights and accordingly, the thickness of the foam gypsum layer varied from 25 to 40 cm;

– at the restored facility, internal repair work due to production necessity was carried out in the autumn-winter period with the heating system not working; at the same time, the fast setting time (20–30 minutes, even taking into account the introduction of a moderator) made it possible to pour nanogypsum at negative temperatures (there was a need to heat the sealing water).

The use of monolithic nanocomposite foam gypsum has made it possible to reduce the cost of major repairs of the historical object (compared with semi-rigid mineral wool slabs, the cost of foam gypsum is several times lower) and accelerate construction work. The technology of preparation of foam gypsum concrete directly at the construction site and the possibility of supplying foam gypsum nanocomposition using flexible hoses under pressure of 0.2–2.5 MPa can significantly reduce the cost of lifting mechanisms.

3D printing technology has made it possible to construct a two-storey residential building in which the interior space of the exterior walls is filled with monolithic foam gypsum. In production conditions, the employees of the Ufa Gypsum Company and USPTU using the 3D printer AMT S1160 ("SPETSAVIA" Yaroslavl) printed fragments of vertical enclosing structures of a one-story small-sized pavilion; then filled with foamed thermal insulation nanocomposite foam gypsum (Fig. 4).

Fig. 4. **Filling with foam gypsum nanocomposition of vertical enclosing 3D constructions**

Technological filling of nanocomposite thermal insulation foam gypsum should be carried out preferably in the warm season for natural drying to a humidity of 12% and strengthening of building constructions. In case of industrial necessity, accelerated drying with heat guns (infrared emitters) can be used until the foam gypsum nanocomposite is completely dry.

DISCUSSION

The molecules of the PBNS foaming agent participate in the formation of the microcellular structure of the foam gypsum and determine the most important characteristics of the thermal insulation nanocomposite: density, thermal conductivity, strength and durability. The supramolecular mechanism of action of the foaming agent consists in the formation of stable air bubbles (gas phase) in a gypsum suspension with a diameter of several tens of micrometers to several millimeters. On the physico-chemical characteristics of three-phase foam in nanocompositional foam gypsum: multiplicity, stability, etc. many variable factors influence – variations in the values of surface tension, pH of the medium, temperature [12]; the intensity of mixing and bubbling on the installation of an ejector-turbulent mixer.

It should be noted that the formation of the nanostructure of gypsum foam compositions in the process of synergetic self-assembly [13] of gypsum crystallohydrates proceeds quite quickly in parallel with the hydration of $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ semihydrate. The colloidal solution $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ crystallizes fairly quickly, and the growing microcrystals of gypsum form a coagulation nanoset; gypsum crystallohydrates are fractal and have sizes from 47 nm to 138 nm.

Difficulties in pore formation gypsum nanosystems represent a technological problem of designing cellular building materials with an average density of 300–400 kg/m^3, characterized by optimal microstructure and providing functional purpose: sound absorption, thermal resistance and other indicators. It is necessary to strive for the creation of a finely porous structure with a uniform distribution of micropores [14] in the volume of foam gypsum thermal insulation material; and in the case when the formation of a porous microstructure in foam gypsum is achieved by traditional methods of introducing gas-forming agents into the molding mixture (aluminum powder, hydrogen peroxide, etc.), due to the rapid kinetics of the reaction with water of the gypsum binder, the mixture turns into a monolith in a short time, not allowing the gas-forming agents to fully pore formation the molding composition. In some cases, to increase the porosity of gypsum, a method is used consisting in the direct addition of pre-made foam to gypsum suspensions.

For the technological production of stable foam in the liquid-phase component, in addition to water, a special surface-active component (foaming agent) must be present able to be adsorbed on the interfacial surface. The effectiveness of foaming agents is determined by the ability of the foam to retain fine mineral particles of gypsum nanowires on its surface for a long time. The transformation of liquid-phase foaming agents into a dry state is based on the binding of water molecules: by the physicochemical (sorption) method – by mixing the foaming agent with a powdered or granular porous sorbent; by the hydration method – by mixing the foaming agent with semi-hydrated gypsum of the G-2 brand, quicklime and Portland cement PC 500.

The study of the mechanism of regulation of microstructural characteristics of nanocomposite foam gypsum obtained by the method of dry mineralization of foam has established that the kinetic stability of foam is a reliable way of regulating porosity. The main technological indicators of foam gypsum: average density, pore size, strength are determined by the characteristics of the nano-binder and foaming agent. Analysis of the microstructure of structural and thermal insulation foam gypsum samples showed that in foam gypsum with a density of 300 kg/m^3, the average diameter of micropores is 0.47 mm, the pore size distribution is dimodal, the pores have a spherical shape. With an increase in the average density to 400 kg/m^3, the size of micropores of foam gypsum decreases and is about 0.38 mm.

To obtain a highly porous foam gypsum with a total porosity of 65–70% and a uniform bimodal pore size distribution, the authors [15] used 1.7 wt. % of nonionic surfactant. Based on the changes in viscosity and temperature in the solidifying foam gypsum, it was found that the nonionic surfactant slows down the crystallization of the gypsum nanocomposition. The increase in viscosity during the crystallization of gypsum stabilizes the micropores formed during foaming. Gypsum foams with a submicron pore size of the matrix and a relatively uniform micropore size of ≈ 92–100 microns were obtained due to a shorter coalescence time of air bubbles.

The use of the PBNS foaming agent reduces the water-gypsum ratio, therefore increases the strength and improves other technological characteristics of the foam gypsum product; ensures the formation of air bubbles uniform in diameter; reduces the viscosity of the foam gypsum composition; slightly slows down hardening, which reduces the time to stripping by 20–25%. The reduced water resistance of foam gypsum products, which manifests itself in a decrease in strength in humid environmental conditions, can be compensated by modifying the gypsum nano-binder by introducing mechano-activated cement and siliceous fillers.

Surfactants have a significant effect on the kinetics of the structure formation of the foam gypsum nanocomposition; the first stage of foaming was the appearance of adsorption layers on the interfacial surface-films of molecules of foaming agents. It should be noted that the regulation of the hardening of gypsum foam binders is considered promising in the design of the initial components of 3D technologies [16–18]; and the determining factor of the aggregate stability of the suspension is the electrostatic barrier of interaction of microparticles. An effective approach to enhance the performance characteristics of building nanocomposites for 3D additive technologies based on gypsum binders is the implementation of controlled hardening with mineral nanoadditives.

The pumpability of foamed gypsum nanocompositions in 3D printing can be enhanced by the addition of 0.8% highly effective superplasticizers based on comb-like polycarboxylate esters, which can significantly increase the consistency retention time [19]. The advantage of 3D printing technology in the construction of buildings using dry foaming agents is: robotization of the construction process, reduction of labor costs for the production of works.

The most popular in the innovative construction industry are cellular wall blocks with a density mark in the range of 300–800 kg/m^3: 300...500 kg/m^3 – thermal insulation foam gypsum, 500...800 kg/m^3 are used as structural and thermal insulation building materials. The elaboration of chemical additives that improve water-repellent characteristics allows the use of porous wall blocks on gypsum binders for the construction of load-bearing internal walls. The volume of cellular porosity of nanostructured foam gypsum is determined by the pore size distribution, the maximum and average size of micropores, their shape, and the thickness of the interpore partitions. The characteristic of micropores in size, which vary from tens of nanometers to millimeter, is a significant factor that determines the compressive strength, thermal conductivity and water permeability of the gypsum foam material.

Positive characteristics of foam gypsum composite nanomaterials (low cost, environmental cleanliness, rapid strength gain, good heat and sound insulation properties, absence of shrinkage deformations, good thermal insulation and sound-absorbing ability, fire resistance, etc.) [20–23] increase the operational qualities of residential buildings. It should also be noted that the use of monolithic gypsum composite nanofoam makes it possible to increase by three times the distance between the racks of thin-walled steel structures of the frame. Reducing the consumption of construction steel is especially in demand in the current aggravated interstate relations and the most difficult conditions for the functioning of the Russian building industry.

CONCLUSION

Technological advantages of using dry mixes: high dosing accuracy, a good degree of homogenization of the

components and stable characteristics of gypsum foam nanomaterials necessitated the elaboration of dry foaming agents. Metered volumes of air, which are supplied through an ejector built into the mixer, provide intensive foaming of the gypsum nanocomposition, in addition, additional cavitation. The compressive strength of foamed foam gypsum with a density of 400 kg/m^3, prepared using dry foaming agent PNBS with a concentration of 0.1–0.2%, is 17% greater than the strength of the thermal insulation building material manufactured according to classical technology by foaming agents in the form of an aqueous solution.

REFERENCE

1. Ferronskaya AV, Korovyakov VF, Baranov IM, Buryanov AF, Losev YuG, Poplavsky VV, Shishkin AV. *Gypsum in low-rise building*. Moscow: Publishing House of the ABU; 2008.

2. Petropavlovskaya VB, Belov VV, Novichenkova TB. *Low-energy gypsum building composites*. Tver: TSTU; 2014.

3. Chernysheva NV, Lesovik VS, Glagolev ES, Volodchenko AA. Effective composites employing fast-hardening gypsum cement binders for additive manufacturing. *Advances in Engineering Research*. 2017; 133: 135–141. Available from: https://dx.doi.org/10.2991/aime-17.2017.23.

4. Kuzmina VP. Mechanisms of nanoadditives influence on gypsum products. *Nanotechnologies in construction*. 2012; 4(3): 98–106.

5. Bessonov IV, Shigapov RI, Babkov VV. Thermal insulation foam gypsum in low-rise construction. *Building materials*. 2014; 7: 9–13.

6. Sinitsin DA, Shayakhmetov USh, Rakhimova ON, Khalikov RM, Nedoseko IV. Nanostructured foam ceramics for building purposes: production technology and applications. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(4): 213–221. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.

7. Kosenko NF, Blinova OV, Veselkova EA. *Foam gypsum composition*. Patent No. 2280627 C1 Russian Federation. Publ. 27.07.2006. Bulletin 21.

8. Gabitova AR, Akhmadullina II, Pechenkina TV, Pudovkin AN, Nedoseko IV. Nanostructural aspects of hydration and hardening of gypsum and gypsum slag compositions based on two-water gypsum. *Building materials*. 2014:(1-2): 46–51.

9. Capasso I, Pappalardo L, Romano RA, Iucolano F. Foamed gypsum for multipurpose applications in building. *Construction and Building Materials*. 2021; 307: 124948. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124948.

10. Kulikov VG. Physicochemical aspects of the disperse SAM systems foaming process. *Nanotechnologies in construction*. 2010; 2(1): 72–90.

11. Khalikov RM, Sinitsyna EA, Silantieva EI, Pudovkin AN, Nedoseko IV. Modifying intensification of the hardening of extruded construction gypsum nanocomposites. *Nanotechnologies in construction*. 2019; 11(5): 549–560. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560.

12. Kruglyakov PM, Exerova DR. *Foam and foam films*. Moscow: Chemistry; 1990.

13. Khalikov RM, Mashukov N.I. *Features of stabilization of natural and synthetic molecular structures*. Nalchik: Publishing House of the RPK; 2010.

14. Morozova NN, Maisuradze NV, Galiev TF, Potapova LI. Efficiency of air-entrapping additives in gypsum materials. *Bulletin of the Technological University*. 2016; 19(2): 31–33.

15. Roch IE, Messing GL. Direct foaming and seeding of highly porous, lightweight gypsum. *Journal of Materials Research*. 2016; 31: 2244–2251. Available from: https://doi.org/10.1557/jmr.2016.246.

16. Ivanova OV, Khalikov RM, Salov AS, Nizamutdinov MKh, Zinnatullin VV. Technological equipment management for 3D additive printing of building nanocomposites. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(2): 117–123. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-117-123.

17. Frolova MA. Aspects of determining the aggregative stability of water suspensions of mineral powders for building composites. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(1): 5–10. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-5-10.

18. Chernysheva N, Shatalova S. Compounding features of composite gypsum binders for porous composites in construction printing technologies. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2020; 945: 012007. Available from: https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012007.

19. Khalikov RM, Ivanova OV, Korotkova LN, Sinitsin DA. Supramolecular impactmechanism of polycarboxylate superplasticizers on controlled hardening building nanocomposites. *Nanotechnologies in Construction*. 2020; 12(5): 250–255. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255.

20. Shakhova LD. The role of foaming agents in foam concrete technology. *Building materials*. 2007. No. 4. P. 16–19.

21. Bessonov IV, Nikolaev MA, Alekseev AL. *Method of obtaining foam gypsum mass by vacuuming in a cavitation activator-disintegrator.* Patent No. 2421424 C1 Russian Federation. Publ. 20.06.2011. Bulletin 17.

22. Bagdasarov AS, Nesterenko AI, Pupkova AYu. Foam gypsum products based on local binders. *Herald of Dagestan State Technical University.* 2018; 45(4): 153–161. Available from: https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-153-161.

23. Matyeva AK, Asanalieva ZhD, Azizova AE. Modified dry concrete mix (foam gypsum concrete). *Science and innovative technologies*. 2019; 2(11): 58–63. Available from: https://doi.org/10.33942/sit11.13.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruslan I. Shigapov – Associate Professor at the "Building Constructions" Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, ufagips@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1382-7416

Dmitry A. Sinitsin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the "Building Constructions" Department, Ufa State Petroleum Technological University; Ufa, Russia, d4013438@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3780-2800

Rauf M. Khalikov – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor at the "Highways and Structural Engineering" Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, rauf_khalikov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7584-5516

Elena A. Solovyeva – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department "Machines and Apparatuses of Food Production", Moscow State University of Technology and Management, Moscow, Russia, solovyva25@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0003-4894-8477

Igor V. Nedoseko – Dr. Sci. (Eng.), Professor at the "Building Constructions" Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, nedoseko1964@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6360-6112

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 05.07.2022; approved after reviewing 28.07.2022; accepted for publication 03.08.2022.

Научная статья
УДК 691.335
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-274-281

CC BY 4.0

Эффективное использование сухих пенообразователей при изготовлении пеногипсовых теплоизоляционных нанокомпозиций

Руслан Илдарович Шигапов[1], Дмитрий Александрович Синицин[1], Рауф Музагитович Халиков[1]*, Елена Анатольевна Соловьева[2], Игорь Вадимович Недосеко[1]

[1] Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

[2] Московский государственный университет технологий и управления, Москва, Россия

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Разработка вспененных экологичных гипсовых нанокомпозитов, обладающих низким удельным весом, высокими теплоизоляционными, эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками, остается актуальной задачей. Контролируемое твердение пеногипсовых нановяжущих с использованием сухих пенообразователей является перспективным направлением в технологии производства теплоизоляционных стройматериалов. **Методы и материалы.** Изготовление пеногипсовой композиции осуществляли в эжекторно-турбулентном смесителе перемешиванием гипсового нановяжущего с функциональными пенообразующими нанодобавками. В качестве вяжущего в работе использовался строительный гипс Г-5БII; поризацию гипсовых композиций осуществляли с использованием адсорбированного пенообразователя ПБНС. **Результаты.** Трансформация жидкофазных пенообразователей в твердофазные связыванием воды позволяет изготавливать пеногипсовые композиции из сухих смесей, что дает высокую точность дозирования, хорошую степень гомогенизации компонентов и устойчивые характеристики вспененных гипсовых нанокомпозиций. В производственных условиях с использованием опытно-промышленного 3D-принтера AMT S1160 построен одноэтажный малогабаритный павильон, в котором вертикальные ограждающие конструкции заполнены вспененным теплоизоляционным наноструктурированным пеногипсом. Монолитный пеногипсовый наноматериал плотностью 300-400 кг/м^3 был использован для утепления и звукоизоляции чердачных перекрытий при капитальном ремонте исторического здания госпиталя ветеранов в г. Уфе. **Обсуждение.** Разработка технологии получения пеногипса из сухих смесей базируется на преимуществе изготовления и применения теплоизоляционных нанокомпозиций, что позволяет обеспечить значительную пунктуальность дозирования и устойчивые характеристики пеногипсовых стройматериалов. Поверхностно активные пенообразователи оказывают существенное влияние на кинетику структурообразования пеногипсовой нанокомпозиции и замедляют коалесценцию воздушных пузырьков. **Заключение.** Нанопористый пеногипсобетон, полученный в результате контролируемого твердения, с плотностью 400 кг/м^3 имеет теплопроводность 0,12 Вт/(м•°С) и прочность при сжатии 1,4 МПа. Прочность на сжатие вспененного пеногипса с использованием сухого пенообразователя на сорбентах на 17% выше прочности теплоизоляционного наноматериала, приготовленного по традиционной технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пеногипсовые наноматериалы, пенообразователи, структурообразование пеногипса, твердение нанокомпозита.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Халиков Р.М., Соловьева Е.А., Недосеко И.В. Эффективное использование сухих пенообразователей при изготовлении пеногипсовых теплоизоляционных нанокомпозиций // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 274–281. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-274-281. – EDN: JCWFCQ.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках реализации национального проекта Российской Федерации «Жилье и городская среда» для возведения индивидуальных жилых малоэтажных домов широко используются современные стройматериалы нанопористой структуры [1–5]. Разработка вспененных нанокомпозиционных экологичных гипсовых вяжущих, обладающих достаточно значительной прочностью, низким удельным

© Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Халиков Р.М., Соловьева Е.А., Недосеко И.В., 2022

весом, высокими теплоизоляционными и морозостойкими свойствами, обеспечивающих получение 3D-конструкций с востребованными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками, остается актуальной задачей.

Цель данной статьи – исследование производства пеногипсовых наноматериалов с использованием эффективных пенообразователей на основе сырьевых ресурсов Башкортостана для возведения малоэтажных зданий.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Получение пеногипсовой нанокомпозиции осуществляли перемешиванием гипсового вяжущего с введенными функциональными нанодобавками, в том числе сухим пенообразователем и водой на установке «Эжекторно-турбулентный смеситель ЭТС-0,5» (фирма «Вефт») (рис. 1).

Метод производства теплоизоляционного пеногипса основан на одностадийном перемешивании в течение 6-8 минут дозированного количества гипсового композиционного нановяжущего и воды из накопительного резервуара. Смеситель ЭТС-0,5 оборудован проточным электронным датчиком контроля уровня воды затворения и реле времени контроля фазы активной поризации наногипсовой композиции. Дозированные объемы воздуха, которые подаются компрессором через встроенный в смеситель эжектор, обеспечивают барботаж и интенсивное пенообразование, кавитацию гипсовой нанокомпозиции. Производительность смесителя ЭТС-0,5 до 5 м^3/час, с подачей нанокомпозиционного пеногипса по шлангам под давлением 0,2–2,5 МПа до 30 метров по горизонтали и до 15 метров по вертикали.

Для измерения коэффициента теплопроводности пеногипсовых образцов размерами 250•250•50 мм использован прибор ИТП-МГ4«100»: диапазон испытаний 0,03–1 Вт / (м•°С), предел относительной погрешности определения коэффициента теплопроводности ±7. Определение теплопроводности образца пеногипса предусматривает создание постоянного теплового потока через образец при фиксированной разности температур на его поверхностях [6].

В качестве нановяжущего в работе использовался строительный гипс Г-5БII (ООО «Уфимская гипсовая компания»). Для регулирования кинетики твердения (замедления сроков схватывания) пеногипсовой смеси применялись нанодобавки – замедлители схватывания: Plast Retard PE (фирма «Retardan», Италия) 0,05% от массы гипсового вяжущего. Разнообразные замедлители твердения обеспечивают контролируемое понижение скорости растворения полугидрата гипса, следовательно, уменьшают концентрацию выпадающих в нежелательный осадок кристаллогидратов дигидрата сульфата кальция [7, 8].

Вспенивающую поризацию гипсовых композиций осуществляли с использованием сухого (сорбированного керамзитным песком) пенообразователя ПБНС со стабилизирующими нанодобавками (ООО «Завод ТехноХимСинтез», г. Уфа), который обеспечивает необходимое воздухововлечение (кратность пены не менее 5) и жизнеспособность трехфазной пены. Пенообразователь ПБНС имеет следующую

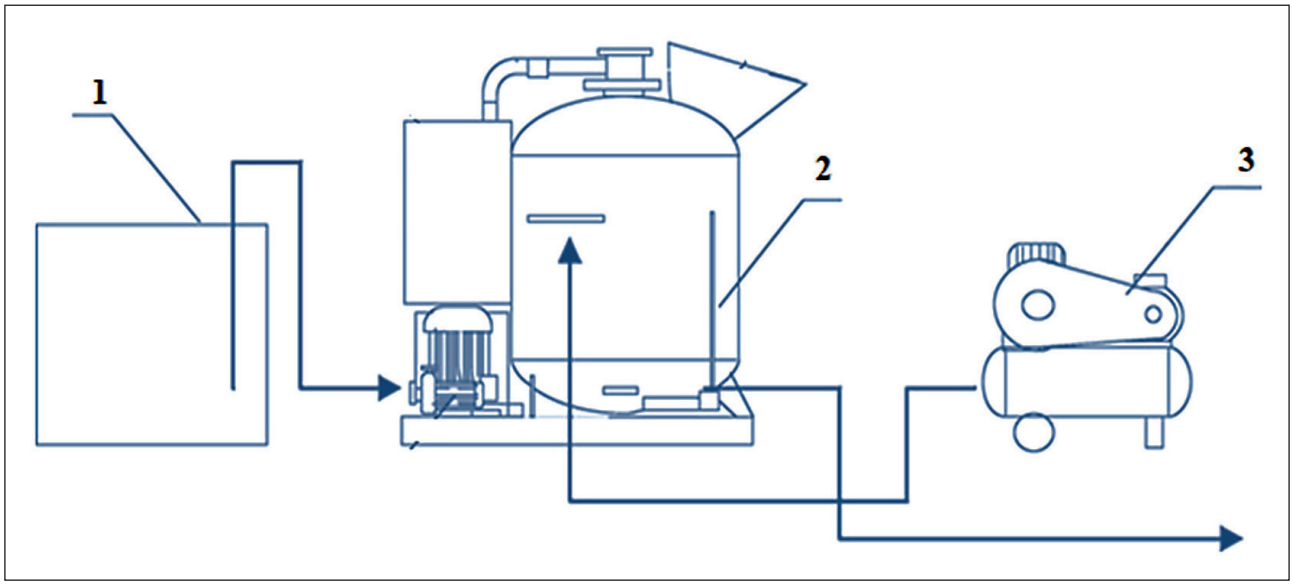

Рис. 1. **Технологическая схема производства пеногипсовой нанокомпозиции:** 1 – накопительный резервуар; 2 – эжекторно- турбулентный смеситель; 3 – компрессор эжектора

химическую структуру: углеводородная цепь C_{10-19} (гидрофобный фрагмент) и гидрофильная функциональная группа.

Концентрированные водные растворы пенообразователя ПБНС превращали в сухое твердофазное состояние методом совместного перемешивания с керамзитовым песком. Устойчивость сухого пенообразователя на адсорбенте объясняется тем, что микрочастицы керамзитового сорбента заряжены положительно, а гидрофильная часть молекулы пенообразователя отрицательно. Адсорбированный пенообразователь с сорбентом высушивали при температуре 20–150°С до влажности 5%; затем высушенный пенообразователь ПБНС измельчали и добавляли (оптимальная концентрация 0,25%) в сухую строительную гипсовую смесь. Разработка технологии получения пеногипса из сухих смесей базируется на преимуществе изготовления и применения сухих смесей: высокая точность дозирования, хорошая степень гомогенизации компонентов и устойчивые характеристики пеногипсовых наноматериалов [9, 10].

При адсорбции на поверхности пузырьков воздуха (рис. 2) гидрофобная углеводородная часть молекул пенообразователя располагается в газовой фазе мономолекулярным слоем, формируя дифинильную прослойку 2,5–3 нм. Локальные микронеоднородности и зародышевые кристаллогидраты нанокластеров дигидрата сульфата кальция размерами ≈ 20–70 нм [11] приводят к вариациям толщины молекулярного слоя пенообразователя в наногипсовой пенокомпозиции. Дальнейшее упрочнение

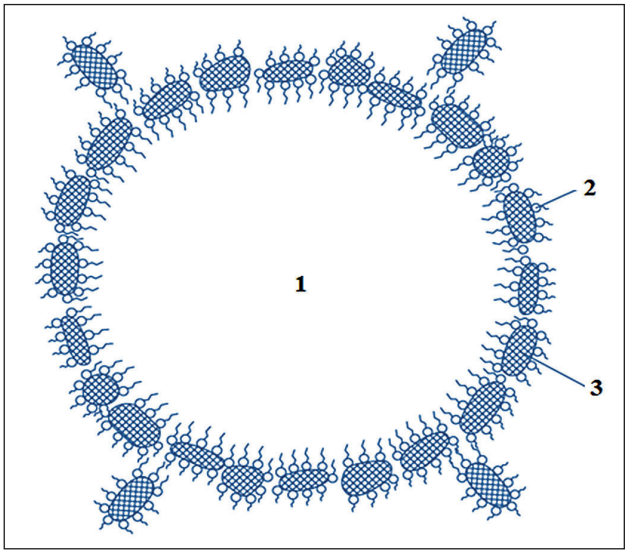

Рис. 2. **Схема адсорбции молекул пенообразователя на поверхности воздушных пузырьков пеногипса:** 1 – газовая фаза; 2 – мономолекулярный слой пенообразователя; 3 – гипсовые кристаллогидраты

первичной наноструктуры происходит за счет роста числа наноконтактов между несвязанными растущими микрокристаллами гипса.

Расход сухого пенообразователя при изготовлении пеногипсовых теплоизоляционных нанокомпозиций составляет 1,7–2,8 кг на 1 м^3 вспененных смесей, что соразмерно расходу жидкофазного пенообразователя. Кратность пены не менее 7,0; устойчивость пены не менее 360 секунд. Оптимальное формирование вспененной гипсовой структуры зависит также от соотношения воды и гипсового нановяжущего; кроме того, следует отметить гидрохимическое качество водного компонента. Повышенная жесткость воды приводит к перерасходу пенообразователя, поэтому необходимо надежное управление качеством функционирования технологической линии водоснабжения.

Плотность и прочность на сжатие пеногипсовых образцов определяли согласно ГОСТ 17177-94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний», ГОСТ EN 1602-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения кажущейся плотности», ГОСТ 125-2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия». Стереоскопический метод исследования форм, размеров микропор пеногипсовых образцов производили на оптическом микроскопе Nicon SMZ 1500.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оптимальная поризация гипсовых нанокомпозиционных материалов сопряжена со значительными трудностями из-за коротких сроков схватывания нановяжущего; введение модифицированного пенообразователя ПБНС оптимизирует кинетику твердения. В процессе вспенивания ориентированные гидрофильной частью молекулы пенообразователя создают адсорбционный слой на гидратированных слоях гипсовых нановяжущих, резко замедляют слияние (коалесценцию) воздушных пузырьков, сохраняют наносуспензию в течение достаточно длительного времени в коллоидном состоянии. Использование поверхностно-активных молекул пенообразователя ПБНС обеспечивает вовлечение необходимого объема микропузырьков воздуха при получении пеногипсовой наносуспензии.

Добавление в состав гипсового нановяжущего пенообразователя ПБНС концентрацией 0,1–0,2% приводит к снижению водогипсового отношения. Изучение технологических параметров вспенивания позволило определить условия кинетической устойчивости пены: уменьшение угловой скорости перемешивания пены вызывает утончение межпоровых перегородок пеногипса с формированием сквозной

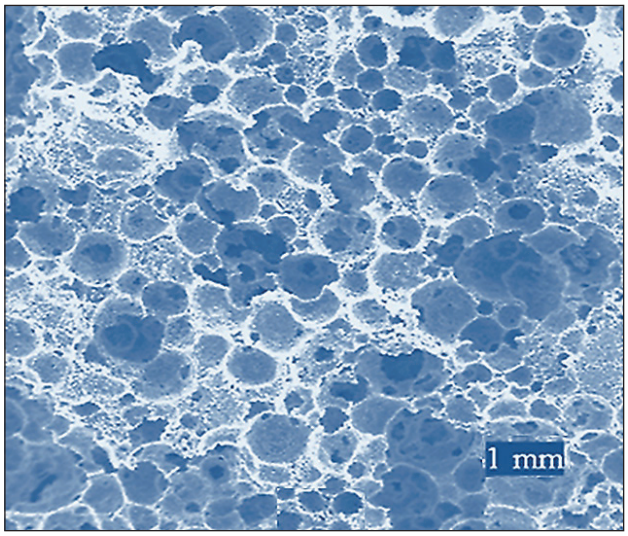

Рис. 3. **Микроструктура наноструктурированного пеногипса с плотностью 400 кг/м³**

пористости. Набор конструкционной прочности пеногипсобетоном занимает от двух до трех часов. Прочность на сжатие вспененного пеногипса с плотностью 400 кг/м³, приготовленного с использованием сухого пенообразователя ПБНС (на сорбенте), больше на 17% прочности теплоизоляционного материала, изготовленного по классической технологии с тем же пенообразователем в форме водного раствора. Установлено, что оптимальное получение замкнутой пористости наноструктурированного пеногипса (рис. 3) обеспечивается при условии, когда скорость диспергирования пены и скорость перемешивания не меняется.

Следует отметить, что использование лишь сборных блоков и плит на основе легких, ячеистых бетонов или пенокерамики с лучшими показателями по теплоэффективности по объективным причинам не может удовлетворить все потребности стройиндустрии в конструкционно-теплоизоляционных стройматериалах. В частности, в условиях капитального ремонта и реставрации объектов архитектурного наследия возможны только монолитные способы производства строительных работ. Выбор конструкционно-теплоизоляционных материалов для монолитных технологий, представленных на строительном рынке, в реальности невелик и практически ограничивается лишь использованием керамзитовых засыпок и керамзитобетона различной плотности в стяжках под полы и для разуклонки плоских малоуклонных кровель.

Наноструктурированный пеногипс является наиболее востребованным и перспективным стройматериалом для монолитного способа производства строительно-монтажных работ и использования конструкционно-теплоизоляционных композитов. Комплексные исследования теплоизоляционных и звукоизоляционных характеристик нанопеногипса, полученного по монолитной технологии (таблица 1), подтвердили его достаточно высокие технологические характеристики.

Монолитный пеногипсовый наноматериал был использован для утепления чердачных перекрытий при капитальном ремонте здания госпиталя ветеранов в г. Уфе взамен пришедшей в негодность шлаковой засыпки, а также в качестве звукоизоляционного и огнезащитного стройматериала межэтажного перекрытия. Практическая эффективность использования наноструктурированного монолитного пеногипса в чердачном и межэтажном перекрытиях состоит в следующем:

– нанокомпозиционный пеногипс (плотностью 300–400 кг/м³) значительно легче шлаковой засыпки (плотность 900–1100 кг/м³), и его использование в перекрытиях позволило существенно облегчить вес перекрытия и уменьшить нагрузку на основные несущие конструкции исторического здания (стены и фундаменты), которые за почти 1,5 столетия эксплуатации получили значительный физический износ;
– монолитный нанопеногипс обеспечивает как достаточную звукоизоляцию межэтажных перекрытий, так и огнезащиту существующих стальных

Таблица 1
Физико-механические и теплотехнические показателей нанокомпозиционного пеногипса

№ п/п	Наименование показателя	Средние значения показателя	
1	Плотность, кг/м³	300	400
2	Теплопроводность в сухом состоянии при t = 25°С, Вт/(м • °С)	0,10	0,12
3	Расчетные характеристики теплопроводности, Вт/(м • °С): – при условиях эксплуатации конструкций «А», – при условиях эксплуатации конструкции «Б»	 0.14 0.23	 0.17 0.26
4	Паропроницаемость, мг/(м • ч • Па)	0.28	0.25
5	Предел прочности при сжатии, МПа	1.1	1.4

балок без дополнительной обработки весьма дорогостоящими огнезащитными вспучивающими окрасочными составами;

– особенно важна при производстве ремонтно-реставрационных работ заливка монолитным нанокомпозиционным пеногипсом, что позволяет обеспечить практически любые требования по геометрическим характеристикам; в частности, при капитальном ремонте здания госпиталя ветеранов войн после демонтажа старых строительных конструкций: дощатого настила, деревянных балок и шлаковой засыпки – выяснилось, что стальные главные балки междуэтажного перекрытия имеют разновысотные отметки, и, соответственно, толщина слоя пеногипса варьировала от 25 до 40 см;
– на реставрируемом объекте внутренние ремонтные работы в связи с производственной необходимостью проводились в осенне-зимний период при неработающей системе отопления; при этом быстрые сроки схватывания (20–30 минут даже с учетом введения замедлителя) позволили осуществлять заливку нанопеногипса при отрицательных температурах (была необходимость подогрева воды затворения).

Использование монолитного нанокомпозиционного пеногипса позволило удешевить работы по капитальному ремонту исторического объекта (по сравнению с полужесткими минераловатными плитами стоимость пеногипса в несколько раз ниже) и ускорить выполнение строительных работ. Технология приготовления пеногипсобетона непосредственно на строительном объекте и возможность подачи пеногипсовой нанокомпозиции при помощи гибких шлангов под давлением 0,2–2,5 МПа позволяет значительно уменьшить затраты на подъемные механизмы.

Технология 3D-печати позволила конструировать двухэтажное жилое здание, в котором внутреннее пространство наружных стен заполнено монолитным пеногипсом. В производственных условиях сотрудниками Уфимской гипсовой компании и УГНТУ с использованием 3D принтера AMT S1160 (ООО «СПЕЦАВИА» г. Ярославль) напечатаны фрагменты вертикальных ограждающих конструкций одноэтажного малогабаритного павильона; далее проведена заливка вспененным теплоизоляционным нанокомпозиционным пеногипсом (рис. 4).

Технологическую заливку нанокомпозиционного теплоизоляционного пеногипса необходимо производить предпочтительно в теплый сезон для естественного высыхания до влажности 12% и упрочнения строительной конструкции. В случае производственной необходимости можно использовать ускоренную сушку тепловыми пушками (инфракрасными излучателями) до полного высыхания пеногипсового нанокомпозита.

Рис. 4. **Заливка пеногипсовой нанокомпозицией вертикальных ограждающих 3D конструкций**

ОБСУЖДЕНИЕ

Молекулы пенообразователя ПБНС участвуют в формировании микроячеистой структуры пеногипса и определяют важнейшие характеристики теплоизоляционного нанокомпозита: плотность, теплопроводность, прочность и долговечность. Супрамолекулярный механизм действия пенообразователя состоит в образовании в гипсовой суспензии устойчивых пузырьков воздуха (газовой фазы) диаметром от нескольких десятков микрометров до нескольких миллиметров. На физико-химические характеристики трехфазной пены в нанокомпозиционном пеногипсе: кратность, стабильность и т.п. – оказывает влияние множество переменных факторов – вариации значений поверхностного натяжения, pH среды, температура [12], интенсивность перемешивания и барботирования на установке эжекторно-турбулентного смесителя.

Следует отметить, что формирование наноструктуры пеногипсовых композиций в процессе синергетической самосборки [13] гипсовых кристаллогидратов протекает достаточно быстро параллельно с гидратацией полугидрата $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$. Коллоидный раствор $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ достаточно быстро кристаллизуется, а растущие микрокристаллы гипса формируют коагуляционную наносетку; гипсовые кристаллогидраты фрактальны и имеют размеры от 47 до 138 нм.

Трудности при поризации гипсовых наносистем представляют технологическую проблему конструирования ячеистых стройматериалов со средней плотностью 300–400 кг/м^3, характеризующихся оптимальной микроструктурой и обеспечивающих функциональное назначение: звукопоглощение, термическое сопротивление и другие показатели. Необходимо стремиться к созданию мелкопористой структуры с равномерным распределением микропор [14] в объеме пеногипсового теплоизоляционного материала; а в случае, когда образование пористой микроструктуры в пеногипсе достигается традиционными методами введения в формовочную смесь газообразователей (алюминиевый порошок, пероксид водорода и др.), из-за быстрой кинетики реакции с водой гипсового вяжущего смесь за короткое время превращается в монолит, не позволяя газообразователям в полной мере поризовать формовочную композицию. В некоторых случаях для увеличения пористости гипса используется способ, заключающийся в прямом добавлении предварительно изготовленной пены в гипсовые суспензии.

Для технологичного получения устойчивой пены в жидкофазном компоненте кроме воды должен присутствовать специальный поверхностно-активный компонент (пенообразователь), способный адсорбироваться на межфазной поверхности. Эффективность пенообразователей определяется способностью пены удерживать длительное время на своей поверхности тонкодисперсные минеральные частицы гипсовых нановяжущих. Трансформация жидкофазных пенообразователей в сухое состояние основывается на связывании молекул воды: физико-химическим (сорбционным) методом – перемешиванием пенообразователя с порошкообразным или гранулированным пористым сорбентом; гидратационным способом – смешиванием пенообразователя с полугидратным гипсом марки Г-2, негашеной молотой известью и портландцементом ПЦ 500.

Изучением механизма регулирования микроструктурных характеристик нанокомпозиционного пеногипса, полученных методом сухой минерализации пены, установлено, что кинетическая устойчивость пены является надежным способом регулирования пористости. Основные технологические показатели пеногипса: средняя плотность, размер пор, прочность – определяются характеристиками нановяжущего и пенообразователя. Анализ микроструктуры образцов конструкционно-теплоизоляционного пеногипса показал, что в пеногипсе плотностью 300 кг/м^3 средний диаметр микропор равен 0,47 мм, распределение пор по размерам димодальное, поры имеют сферическую форму. С повышением средней плотности до 400 кг/м^3 размер микропор пеногипса уменьшается и составляет около 0,38 мм.

Для получения высокопористого пеногипса с общей пористостью 65–70% и однородным бимодальным распределением пор по размерам авторы [15] использовали 1,7 мас. % неионную поверхностно-активную нанодобавку. Основываясь на изменениях вязкости и температуры затвердевающего пеногипса, установлено, что неионное поверхностно-активное вещество замедляет кристаллизацию гипсовой нанокомпозиции. Увеличение вязкости при кристаллизации гипса стабилизирует микропоры, образующиеся при вспенивании. Были получены гипсовые пены с субмикронным размером пор матрицы и относительно однородным размером микропор ≈ 92–100 мкм за счет уменьшения времени коалесценции воздушных пузырьков.

Использование пенообразователя ПБНС позволяет снизить водогипсовое отношение, поэтому увеличивается прочность и улучшаются другие технологические характеристики пеногипсового изделия; обеспечивает формирование равномерных по диаметру пузырьков воздуха; снижает вязкость пеногипсовой композиции; незначительно затормаживает твердение, что на 20–25% сокращает время до распалубки. Пониженную водостойкость пеногипсовых изделий, которая проявляется в уменьшении прочности во влажных условиях среды, можно компенсировать модификацией гипсового нановяжущего введением механоактивированного цемента и кремнистых наполнителей.

Поверхностно активные пенообразователи оказывают существенное влияние на кинетику структурообразования пеногипсовой нанокомпозиции; первой стадией пенообразования являлось появление на межфазной поверхности адсорбционных слоев-пленок молекул пенообразователей. Следует отметить, что регуляция твердения пеногипсовых вяжущих считается перспективным при конструировании исходных компонентов 3D-технологий [16–18], а определяющим фактором агрегативной устойчивости суспензии является электростатический барьер взаимодействия микрочастиц. Эффективным подходом усиления эксплуатационных характеристик строительных пенонанокомпозитов для 3D аддитивных технологий на базе гипсовых вяжущих является реализация регулируемого твердения с минеральными нанодобавками.

Перекачиваемость вспененных гипсовых нанокомпозиций в 3 D-печати можно усилить добавлением 0,8% высокоэффективных суперпластификаторов на базе гребнеобразных поликарбоксилатных эфиров, которые позволяют значительно увеличить время сохранения консистенции [19]. Преимуществом технологии 3D-печати в строительстве зданий с использованием сухих пенообразователей является роботизация строительного процесса, снижение трудозатрат на производство работ.

Наиболее востребованными в инновационной стройиндустрии являются стеновые ячеистые блоки с маркой по плотности в диапазоне 300–800 кг/м^3: 300...500 кг/м^3 – теплоизоляционные пеногипсы, 500...800 кг/м^3 используются в качестве конструкционно-теплоизоляционных стройматериалов. Разработка химических нанодобавок, улучшающих водоотталкивающие характеристики, позволяет использовать поризованые стеновые блоки на гипсовых вяжущих для возведения несущих внутренних стен. Объем ячеистой пористости наноструктурированного пеногипса определяется распределением пор по размерам, максимальным и средним размером микропор, их формой, толщиной межпоровых перегородок. Характеристика микропор по размерам, которые варьируются от десятков нанометров до миллиметра, является значительным фактором, который определяет прочность на сжатие, теплопроводность и водопроницаемость пеногипсового материала.

Позитивные характеристики композиционных пеногипсовых наноматериалов (невысокая стоимость, экологическая чистота, быстрый набор прочности, хорошие тепло- и звукоизолирующие свойства, отсутствие усадочных деформаций, хорошая термоизоляционная и звукопоглощающая способность, огнестойкость и др.) [20–23] повышают эксплуатационные качества жилых зданий. Следует также отметить, использование монолитного нанопеногипса позволяет увеличить в три раза расстояние между стойками тонкостенных стальных конструкций каркаса. Уменьшение расхода строительной стали особенно востребовано в нынешних обострившихся межгосударственных взаимоотношениях и сложнейших условиях функционирования российской стройиндустрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Технологические преимущества использования сухих смесей: высокая точность дозирования, хорошая степень гомогенизации компонентов и устойчивые характеристики пеногипсовых наноматериалов – вызвали необходимость разработки сухих пенообразователей. Дозированные объемы воздуха, которые подаются через встроенный в смеситель эжектор, обеспечивают интенсивное пенообразование гипсовой нанокомпозиции, кроме того, дополнительную кавитацию. Прочность на сжатие вспененного пеногипса плотностью 400 кг/м^3, приготовленного с использованием сухого пенообразователя ПНБС концентрацией 0,1–0,2% больше на 17% прочности теплоизоляционного стройматериала, изготовленного по классической технологии пенообразователями в форме водного раствора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ферронская А.В., Корвяков В.Ф., Баранов И.М., Бурьянов А.Ф., Лосев Ю.Г., Поплавский В.В., Шишин А.В. Гипс в малоэтажном строительстве. М.: Изд-во АСВ, 2008. 240 с.

2. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Новиченкова Т.Б. Малоэнергоемкие гипсовые строительные композиты. Тверь: ТГТУ, 2014. 136 с.

3. Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Glagolev E.S., Volodchenko A.A. Effective composites employing fast-hardening gypsum cement binders for additive manufacturing // *Advances in Engineering Research*. 2017. V. 133. P. 135–141. https://dx.doi.org/10.2991/aime-17.2017.23.

4. Кузьмина В.П. Механизмы воздействия нанодобавок на гипсовые продукты // Нанотехнологии в строительстве. 2012. Т. 4, № 3. С. 98–106.

5. Бессонов И.В., Шигапов Р.И., Бабков В.В. Теплоизоляционный пеногипс в малоэтажном строительстве // Строительные материалы. 2014. № 7. С. 9–13.

6. Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.

7. Косенко Н.Ф., Блинова О.В., Веселкова Е.А. Пеногипсовая композиция / Патент № 2280627 С1 Российская Федерация. Опубл. 27.07.2006. Бюл. № 21.

8. Гаитова А.Р., Ахмадулина И.И., Печенкина Т.В., Пудовкин А.Н., Недосеко И.В. Наноструктурные аспекты гидратации и твердения гипсовых и гипсошлаковых композиций на основе двуводного гипса // Строительные материалы. 2014. № 1-2. С. 46–51.

9. Capasso I., Pappalardo L., Romano R.A., Iucolano F. Foamed gypsum for multipurpose applications in building // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 307. 124948. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124948.

10. Куликов В.Г. Физико-химические аспекты процессов пенообразования дисперсными системами ПАВ // Нанотехнологии в строительстве. 2010. Т. 2, № 1. С. 72–90.

11. Халиков Р.М., Синицина Е.А., Силантьева Е.И., Пудовкин А.Н., Недосеко И.В. Модифицирующее усиление твердения прессованных строительных гипсовых нанокомпозитов // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 11, № 5. С. 549–560. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560.

12. Кругляков П.М., Ексерова Д.Р. Пена и пенные пленки. М: Химия, 1990. 425 с.

13. Халиков Р.М., Машуков Н.И. Особенности стабилизации природных и синтетических молекулярных структур. Нальчик: Изд-во РПК, 2010. 148 с.

14. Морозова Н.Н., Майсурадзе Н.В., Галиев Т.Ф., Потапова Л.И. Эффективность применения воздухововлекающих добавок в гипсовых материалах // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19, № 2. С. 31–33.

15. Roch I.E., Messing G.L. Direct foaming and seeding of highly porous, lightweight gypsum // *Journal of Materials Research*. 2016. V. 31. P. 2244–2251. https://doi.org/10.1557/jmr.2016.246.

16. Иванова О.В., Халиков Р.М., Салов А.С., Низамутдинов М.Х., Зиннатуллин В.В. Технологичное управление оборудованием для 3D-аддитивной печати строительных нанокомпозитов // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 2. С. 117–123. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-117-123.

17. Фролова М.А. Аспекты определения агрегативной стабильности водных суспензий минеральных порошков для строительных композитов // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 1. С. 5–10. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-1-5-10.

18. Chernysheva N., Shatalova S. Compounding features of composite gypsum binders for porous composites in construction printing technologies // IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2020. V. 945. P. 012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012007.

19. Халиков Р.М., Иванова О.В., Короткова Л.Н., Синицин Д.А. Супрамолекулярный механизм влияния поликарбоксилатных суперпластификаторов на управляемое твердение строительных нанокомпозитов // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Т. 12, № 5. С. 250–255. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255.

20. Шахова Л.Д. Роль пенообразователей в технологии пенобетонов // Строительные материалы. 2007. № 4. С. 16–19.

21. Бессонов И.В., Николаев М.А., Алексеев А.Л. Способ получения пеногипсовой массы путем вакуумирования в кавитационном активаторе-дезинтеграторе / Патент № 2421424 C1 Российская Федерация. Опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.

22. Багдасаров А.С., Нестеренко А.И., Пупкова А.Ю. Пеногипсовые изделия на основе местных вяжущих // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2018. Т. 45, № 4. С. 153–161. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-153-161.

23. Матыева А.К., Асаналиева Ж.Д., Азизова А.Э. Модифицированная сухая бетонная смесь (пеногипсобетон) // Наука и инновационные технологии. 2019. № 2(11). С. 58–63. https://doi.org/10.33942/sit11.13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шигапов Руслан Илдарович – доцент кафедры «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, ufagips@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1382-7416

Синицин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, d4013438@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3780-2800

Халиков Рауф Музагитович – кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, rauf_khalikov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7584-5516

Соловьева Елена Анатольевна – кандидат технических наук, зав. кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств», Московский государственный университет технологий и управления, Москва, Россия, solovyva25@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0003-4894-8477

Недосеко Игорь Вадимович – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, nedoseko1964@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6360-6112

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.07.2022; одобрена после рецензирования 28.07.2022; принята к публикации 03.08.2022.

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-282-293

CC BY 4.0

Design and research of Nielsen arch bridge with fully composite structure system

Luojin Cao[1], Nianqin Liu[3], Xiangyu Li[2], Wenming Que[3], Yong Li[1,*]

[1] College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China
[2] Shenzhen College of international Education, Shenzhen, Guangdong 518110, China
[3] Shenzhen Bridge Design and Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518043, China

* Corresponding author: e-mail: Liy2000@163.com

ABSTRACT: China is the kingdom of arch bridges. Based on the principle of structural elastic potential energy standing value, the innovative application of the design theory of composite arch bridge bending and compression is presented, optimize the design of composite structural arch bridge arch axis, and propose the design and construction method of medium-bearing composite Nielsen arch bridge. The design of the medium-bearing composite Nielsen arch bridge is carried out, its structural strength, stiffness and stability are analyzed by finite element analysis. By simulating the parameters of arch axis, sagittal span ratio and arch section, the convergent composite arch axis with solid web foot section is adopted to improve the economic spanning capacity of the composite Nielsen arch bridge and expand the adaptation range of large span arch bridge in plain area or soft base area.

KEY WORDS: fully composite structural system; composite arch bridge; concrete filled steel tube; Nielsen Arch; composite arch axis.

FOR CITATION: Luojin Cao, Nianqin Liu, Xiangyu Li, Wenming Que, Yong Li. Design and research of Nielsen arch bridge with fully composite structure system. *Nanotechnologies in Construction.* 2022; 14(4): 282–293. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-282-293. – EDN: ICTMEE.

INTRODUCTION

In recent years, with the rapid development of the Belt and Road Initiative and China's infrastructure construction, many heavenly rift valleys have been crossed, in which bridge engineering plays a great role. Arch bridge is one of the main forms of large span bridges, which has the advantages of high strength, large spanning capacity and beautiful shape.

According to the construction form of arch, arch bridges can be divided into deck arch bridge, half through arch bridge and through arch bridge. In terms of materials, it includes steel arch bridge, concrete arch bridge and composite structure arch bridge. Composite structural system arch bridge has the advantages of both steel and concrete arch bridge, and has larger span capacity than traditional arch bridge. When the span of the bridge exceeds 200 m, it is suitable to use the composite structure arch bridge. Composite arch bridge main arch section design, according to domestic and foreign actual bridge data, span diameter in 100 m below the arch rib usually use a single steel pipe section; span in 100m ~200 m below the arch rib more than 2 steel pipes dumbbell-shaped component section; span in 200m above the use of 4 or more concrete filled steel tube truss section form, the arch rib section often uses variable section form.

1. DESIGN

1.1. Overall Design

A bridge in South China. The city is separated by Qingjiang river, which is 240m wide at the widest point, 175 m wide at the narrowest position and 25 m deep. The location of the bridge was selected according to the development of the city and the surrounding environment. The bridge adopts 210 m span medium-bearing composite Nielsen arch bridge with 25 m width and 1/3.818 sagittal span ratio. The bridge adopts city main road standard, design speed 50 km/h, design load adopts city-A, crowd load 3.5 kN/m, peak acceleration value of ground vibration 0.05 g, bridge seismic measures level 2, design reference period 100 years.

© Luojin Cao, Nianqin Liu, Xiangyu Li, Wenming Que, Yong Li, 2022

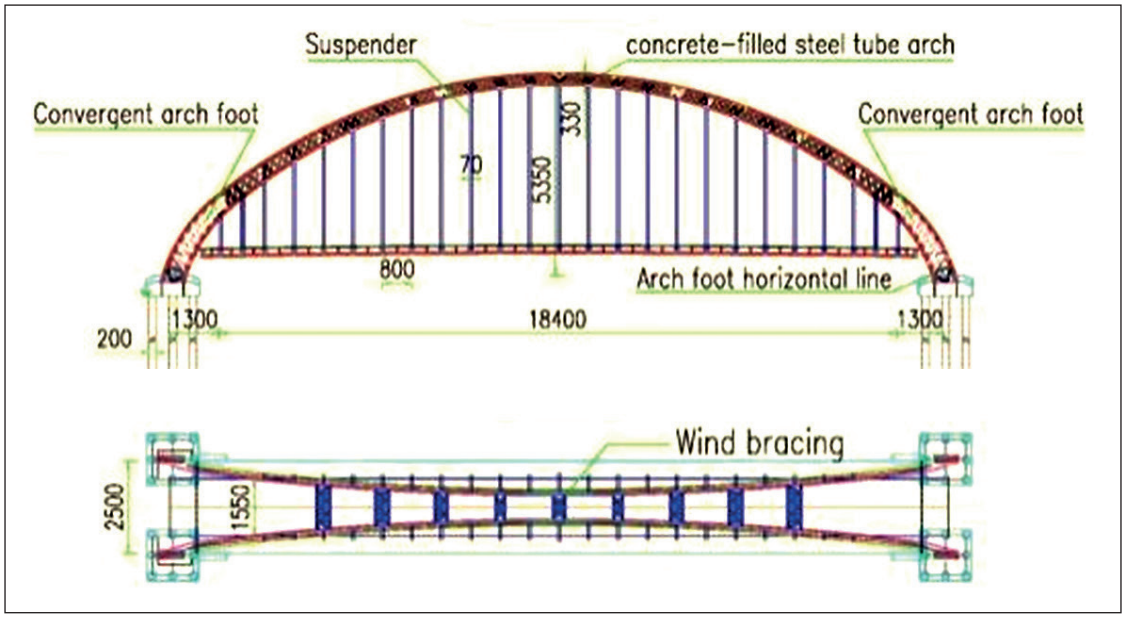

Fig. 1. **Fully Composite Structure System Nielsen Arch Bridge**

The main arch adopts concrete filled steel tube truss arch with concrete encasement at the foot of the arch. The composite arch axis is composed of suspension chain line and parabolic line, with arch axis coefficient 1.756 and pre-arch degree L/600, which is set according to the secondary parabolic line. The main beam adopts wave-truss-slab PC combination beam with a height of 2.2 m.

1.2. Main Arch Design

1.2.1. Main Arch

The arch ribs are 2 pieces of truss Nielsen type arch ribs with 80.707° dip angle, each piece of arch ribs consists of 4 upper and lower chord steel pipes (Ø 900×16 mm) and upper and lower flat link (Ø 600×12 mm, double limbs at the boom Ø 600×16 mm), webbing (Ø 299×10 mm, webbing at the foot section Ø 351×12 mm) welded into four limbs lattice truss section, section height from 3.3 m tapered to 6.527 m, width 2.3 m.

C60 self-compacting concrete was pumped in the upper and lower chord main steel pipes and the solid web section of the foot of the arch, with the feeding position at the upper edge of the chord steel pipes in the foot of the arch main steel pipe section. The transverse center distance between the centers of two arch ribs at the top of the arch is 8.0 m, and the transverse center line distance of the foot of the arch is 26 m.

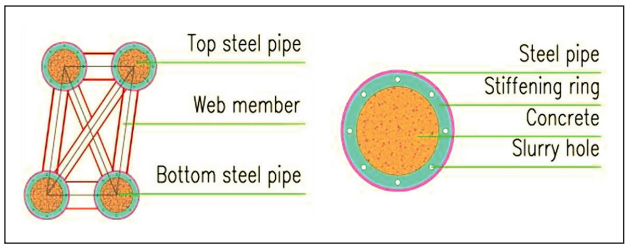

Fig. 2. **Arch section form**

1.2.2. Composite arch axis

The composite Nielsen arch bridge has the advantage of more balanced and reasonable load distribution in the transverse direction compared with the parallel arch bridge. The bridge deck load is transferred to the main arch to realize the redistribution of stress in the main arch, which is a self-balancing structural system and significantly improves the overall stability of the structure.

The arch bridge is a thrust system, by optimizing the arch axis, adopting convergent arch footings, adjusting the inclination of the footing support surface, reducing the horizontal component of the arch axial force, reducing the number of horizontal ties and the workload of cable adjustment.

1) Under the action of constant load, the horizontal thrust generated by the main arch is balanced by horizontal ties and convergent arch footing, thus reducing the horizontal thrust of the arch footing on the foundation of the main arch structure, i.e.

$$H_1 = |H_2 + H_3|, \quad (1)$$

where: H_1 is the horizontal thrust generated by the main arch under the action of constant load; H_2 is the ten-

sion generated by the horizontal ties; H_3 is the horizontal resistance generated by the bearing and pile foundation.

2) Under the action of variable load, the horizontal thrust force generated by the structure is still balanced by the horizontal ties and foundation, i.e.

$$\Delta H_1 = |H'_2 + H'_3|, \quad (2)$$

where: ΔH_1 is the horizontal thrust generated by the main arch under live load; H'_2 is the tension generated by the horizontal ties under live load; H'_3 is the horizontal resistance generated by the bearing and pile foundation under live load.

$$\begin{cases} \frac{f_1}{m-1}(chk\,\xi) = f_2 + \sqrt{x_2 - L_1} & (3) \\ \frac{kf_1}{m-1} s\square kx = \frac{1}{2\sqrt{x_2 - L_1}} & (4) \end{cases}$$

Among them, $\xi = x_1/L_1$; $m = g_i/g_d$; $s\square k\xi = (e^{k\xi} + e^{-k\xi})/2$; $k = ch^{-1}m = \ln(m + \sqrt{m^2 - 1})$.

1.2.3. Transverse coupling system

Bridge arch rib a total of 50 pairs of booms, double boom longitudinal spacing of 8m, double boom spacing of 0.7 m, bridge deck at the boom transverse spacing of 18.5 m boom cable using extruded double HDPE epoxy steel strand finished cable, each boom by 31 Ø 15.2 mm epoxy spraying high-strength low loosening, strength level of 1860 MPa prestressed steel hinges, anchor head using high-performance extrusion cold casting anchor, can Adjustable cable force. The inner layer is black, and the outer layer is sky blue.

1.2.4. Stay Cable

Bridge arch rib is a total of 50 pairs of booms, double boom longitudinal spacing of 8m, double boom spacing of 0.7 m, bridge deck at the boom transverse spacing of 18.5 m. boom cable using extruded double HDPE epoxy steel strand finished cable, each boom by 31 Ø 15.2 mm epoxy spraying high-strength low loosening, strength level of 1860 MPa prestressed steel hinges, anchor head using high-performance extrusion cold casting anchor, can Adjustable cable force. The inner layer is black, and the outer layer is sky blue.

1.2.5. Horizontal ties

There are 24 bundles (including 4 spare bundles), 12 high-strength low-relaxation prestressing steel strand bundles on each side, each bundle consists of 19 Ø 15.2 mm epoxy steel strands, the standard strength of steel strand fpk = 1860 Mpa, the tied bundle is set in the small steel box tied box at the top of the longitudinal beam, anchored at the cross beam of the arch rib. The bollard strand bundle protects the concrete wire bundle with high-density polyethylene double sheathing, all in black.

1.3. Main Beam Design

1.3.1. Longitudinal Beam

The whole bridge has through-length side longitudinal beam 2 pieces, side longitudinal beam height 2.1 m, side longitudinal beam web for waveform steel web, wavelength is 1000 mm, wave height 200 mm, wave plate thickness is 14 mm, web center spacing 1.3 m, side longitudinal beam lower edge for steel pipe truss composition, lower chord steel pipe with Ø 600×12 mm, steel pipe flat link with Ø 500×12 mm, longitudinal beam upper edge for through-length steel plate, top plate 2.0 m, thickness of 20mm, two sides of the longitudinal beam center distance of 18.5 m.

1.3.2. Crossbeam

The bridge has 25 crossbeams, crossbeams using triangular steel pipe crossbeam, beam length 25 m, end crossbeam length 29 m, crossbeam longitudinal spacing 8 m,

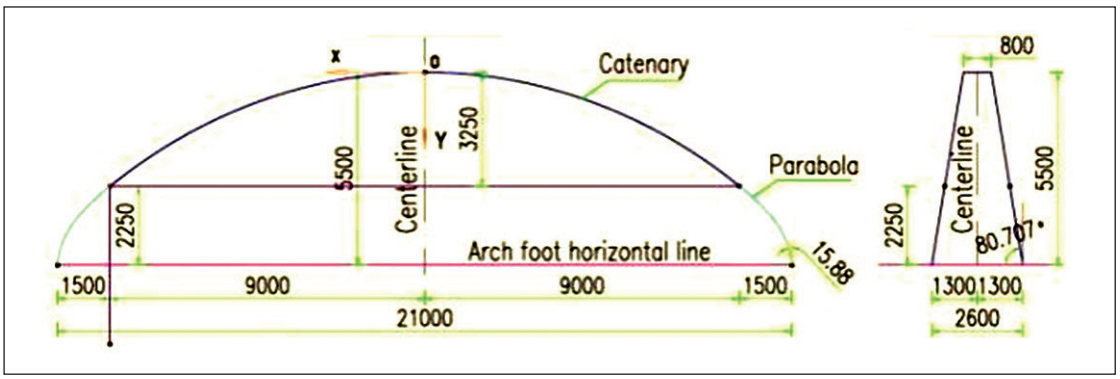

Fig. 3. **Suspension chain line + parabolic composite arch axis**

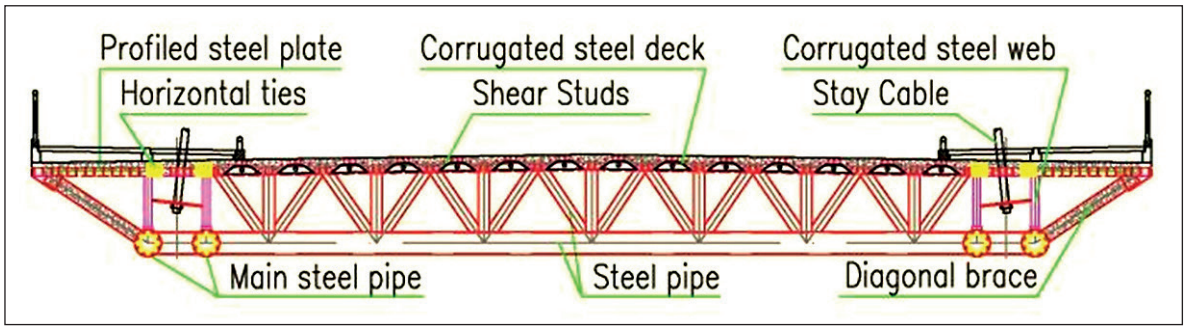

Fig. 4. **Deck of wave-truss composite structure**

crossbeam lower chord supervisor using Ø 500×14 mm, by Ø 299×10 mm web welding into triangular limb lattice truss type section; sidewalk cantilever plate using concrete filled steel tube cantilever brace tube, Ø 299×12 mm.

2. CALCULATION AND ANALYSIS

Using the calculation results of Midas/civil 2017 calculation software, the model of the whole bridge has a total of 6984 nodes and 12 002 units, the concrete filled steel tube arch ribs and diagonal bracing use SRC combination interface, which is automatically converted to steel by the software according to the strength equivalence principle; the inter-arch support, end crossbeam, main beam lower chord and web are used beam units; the solid web section of the arch foot uses solid units; the boom and horizontal The model adopts the nodal elastic support model pile soil effect, and the corrugated steel webs are simulated by the plate unit. As flat steel webs are used to simulate corrugated steel webs, the effective compressive elastic modulus, flexural elastic modulus and shear modulus of flat steel webs G_{eff} are calculated according to the following formula:

$$G_{eff} = \frac{(b_w + l_w \cos\theta) t_w^2 E_s}{(2b_w^2 l_w + 3b_w^3)(\sin\theta)^2 + t_w^2 b_w + t_w^2 l_w (\cos\theta)^2}$$

$$G_{eff} = \frac{(b_w + d_w) G_w}{b_w + \frac{d_w}{\cos\theta}}$$

According to the formula, E_s is the modulus of elasticity of steel, b_w is the length of flat section of waveform steel web, t_w and l_w are the thickness of waveform steel web and length of inclined plate section, θ is the inclined plate inclination angle, $b_w = l_w \cos\theta$. When the inclination angle of the inclined plate section is greater than 20°, the equivalent flexural modulus of the waveform steel web is close to 0. At this time, the deformation stiffness of the waveform steel web in the axial direction can be ignored. The inclination angle of the inclined plate segments of this bridge is 38.66°, so the effective flexural compressive elastic modulus and flexural elastic modulus are selected to be 0, and the effective shear elastic modulus G_{eff} = 6.38×10⁴N/mm².

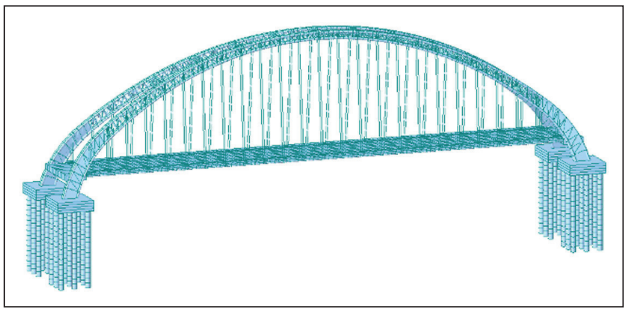

Fig. 5. **Composite Nielsen arch bridge finite element model**

2.1. Calculated load and boundary conditions

Design load: City-A, transverse arrangement of 6 lanes. Consider span longitudinal discount factor 0.97, live load impact factor is taken as 1.07. Overall temperature load: warming 25 degrees, cooling 20 degrees considered. Local temperature load: temperature gradient of main arch is taken as 8°C, and temperature gradient of main beam is taken as 14°C. The base displacement is 100mm vertical displacement and 6mm horizontal displacement of the support. each load combination is as follows: 1) combination 1: (basic combination 1): 1.1 × (1.2 constant load + 1.4 live load + 0.825 wind load + 1.05 overall warming + 0.5 uneven settlement); 2) combination 2: (basic combination 2): 1.1 × (1.2 constant load + 1.4 live load + 0.825 wind load + 1.05 overall cooling + 0.5 uneven settlement); 3) combination 3: (standard combination 1): 1 constant load + 1 live load + 1 wind load + 1 overall warming + 1 uneven settlement; 4) combination 4: (standard combination 2): 1 constant load + 1 live load + 1 wind load + 1 overall cooling + 1 uneven settlement.

Boundary conditions: the pile foundation is rigidly connected to the bearing platform; the pile foundation is elastically supported by nodes with the foundation, and the spring stiffness is calculated by the M method; the

mid-span main beam is connected to the crossbeam bull leg by springs.

2.2. Static force analysis

2.2.1. Structural strength

According to the finite element analysis results, the arch axis consists of the middle section suspension chain line and the two ends parabolic line, the middle section is mainly in the form of arch pressure, the two ends are closer to the form of rigid frame structure force, constant load thrust can be balanced by the ties. The composite stresses of the arch rib steel members under the basic combination are in the range of –26.2MPa~192.5MPa, and the composite stresses of the main beam are in the range of –185.3MPa~222.4MPa, which meet the code requirements.

2.2.2. Structural stiffness

The structural stiffness (normal use limit state) is verified by standard combination, and the displacement envelope under the most unfavorable load combination of the whole bridge is shown in Fig. 6. The maximum vertical displacement of the main beam is 123.5 mm in the middle of the span, which is l/1700 < 1/800 of the span, meeting the specification requirements.

2.2.3. Analysis of convergent arch footing test

In order to study the influence of convergent arch footing on horizontal thrust, the analysis is calculated according to tensioned horizontal ties and untensioned horizontal ties respectively, the maximum horizontal thrust of main arch footing is 63856 kN. the maximum shear force of untensioned horizontal ties is 20,167 KN, the maxi-

Table 1
Summary of stress calculation results

Section	Group 1 (MPa)	Group 2 (MPa)	Group 3 (MPa)	Group 4 (MPa)
Maximum stress of on main arch	142.4	128.6	153.5	137.2
Maximum stress of arch rib under main arch	177.7	165.2	193.5	181.3
Main arch horizontal joint maximum stress	168.3	151.2	147.8	133.9
Maximum stress of main arch belly bar	**192.5**	201.5	188.5	191.7
Maximum stress of concrete in arch	**–26.2**	–25.1	–23.8	–23.5
Maximum wind support stress	–162.2	–151.8	–143.1	–133.7
Maximum stress of main girder chord	211.5	**222.4**	198.8	173.2
Maximum stress of web of main girder	160.7	166.6	143.2	138.7

Table 2
Summary of calculation results of internal force of arch foot

State	Longitudinal bridge thrust (kN)	Vertical force (kN)	Bending moment in arch surface (kN•m)	Torque (kN•m)
Constant load	8178.3	36483.2	–42395.6	–6005.9
Crowd load	1467.1	–1292.4	–11060.3	–1810.1
heating	455.7	1.6	–21029.5	–5337.4
cooling	–915.4	–1.4	22202.6	5291.8
Lane load max	2348.1	56.4	16846.3	2595.4
Lane load min	–81.4	–2037.9	–32051.3	–5102.4
Settlement max	0.1	4.7	562.1	86.2
Settlement min	–0.3	–4.7	–555.0	–84.8
Basic combination max	18011.9	33711.1	37631.6	8506.4
Basic combination min	4833.7	50492.5	–174764.8	27891.6

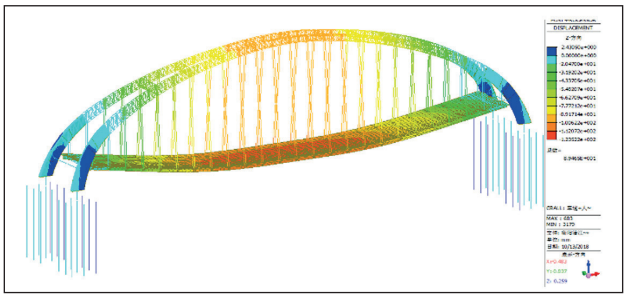

Fig. 6. **Displacement under the most unfavorable load**

mum bending moment is 210680 KNm, the maximum shear force after tensioned horizontal ties (0.4R_y^b) is 14688 KN, the maximum bending moment 104777 KNm, a reduction of 50.3%.

2.2.4. Foundation Displacement and Temperature Response

By calculating combination 3 and combination 4 separately, the effects of foundation dislocation and temperature action on the structure are analyzed. The study shows that compared with load combination 1, the arch rib stress increases by 5.3% when the support is unevenly settled by 100 mm; the arch rib stress increases by 0.38% when the support is horizontally displaced by 6mm; and the arch rib stress increases by 11.9% when the temperature decreases by 20°C.

2.2.5. Fatigue Assessment

According to (Code for design of highway steel structure bridges) (JTGD64-2015) Article 5.5.2, carry out checking calculation adopt calculation model I, concentrated load is 0.7 Pk,the uniformly distributed load is 0.3 qk.Then,under fatigue load,as shown in Figure 3.16, the maximum stress amplitude of the main beam is: 38.8 + 21.3 = 59.1 MPa. According to Appendix C Fatigue details table C.0.5 of the (Code for design of highway steel structure bridges): Butt weld fatigue detail category Δσc = 100MPa, Δσd = 0.737, Δσc = 0.737×100=73.7 MPa, according to the calculation results, the fatigue stress amplitude is less than the allowable value, which meets the design requirements.

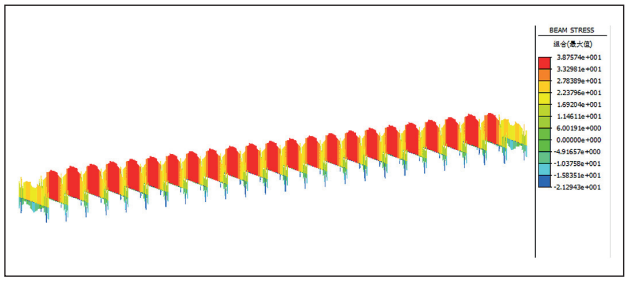

Fig. 7. **Normal stress envelope under the most unfavorable fatigue load combination of the whole bridge**

2.3. Checking calculation of bearing platform and arch seat

The known cushion cap is 4 m high, 14.6 m wide, arch seat height 1.5 m, pile spacing 2 m, since the distance between piles is less than 3 times the pile diameter, therefore, the full width of the cushion cap is taken as the calculated width of the cushion cap. The distance between the center of the pile and the edge of the arch seat is less than the height of the pile cap, according to the specification, the bearing capacity is checked according to the tension and compression bar model method.

$$\theta_1 = \tan^{-1}[h_0/(a + x_1)].$$

In the formula θ_1 is the included angle between the inclined compression rod and the pull rod h_0 is the effective height of bearing platform (mm), a is the distance from the intersection of the center line of the compression bar and the top surface of the bearing platform to the edge of the pier and abutment, Let $a = 0.15h_0$, x_1 is the distance from the pile center to the edge of pier and abutment.

$$\gamma_0 C_{i,d} \le t b_s f_{ce,d}$$

$$f_{ce,d} = \frac{\beta_c f_{cd}}{0.8 + 170\varepsilon_1} \le 0.85\beta_c f_{cd}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{T_{i,d}}{A_s E_s} + \left(\frac{T_{i,d}}{A_s E_s} + 0.002\right)\cot^2\theta_i$$

$$t = b\sin\theta_i + h_a\cos\theta_i$$

$$h_a = s + 6d$$

In the formula γ_0 is the important coefficient of bridge structure $C_{i,d}$ is the design value of the internal force of the compression bar; $f_{ce,d}$ is the design value of equivalent compressive strength of concrete compression bar Ti,d is the design value of the internal force of the tie rod β_c is the relevant parameter of concrete strength grade f_{cd} is the design value of concrete axial compressive strength A_s is the area of tie bar reinforcement within the calculated width of bearing platform E_s is the elastic modulus of reinforcement.

According to the calculation, $\gamma_0 C_{i,d}$ = 52225kN < $t b_s f_{ce,d}$ = 358341 kN, Meet the specification requirements.

2.4. Structural stability

The wind stability is a problem of large span arch bridge. The stability analysis considers the loads, the moving load is arranged according to the most unfavorable

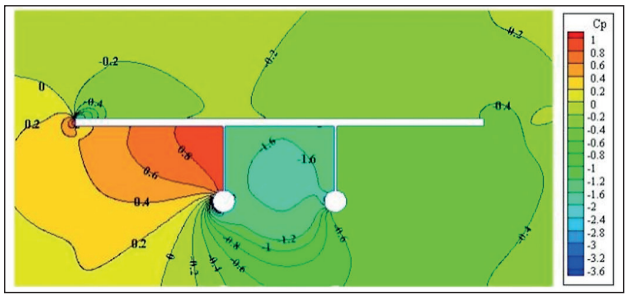

Fig. 8. **Average wind pressure distribution**

working condition of the arch foot axial force, the design wind speed is 27.2 m/s (10m high from the ground, 1% frequency, 10 min average maximum wind speed value), and the wind resistance coefficient of the single arch rib section is 1.4.

The structural stability calculation of this bridge is carried out by the spatial finite element method. Calculation, respectively, in the bridge deck applied live load, the stability safety factor K of the structure is defined as Pcr/PT, where Pcr is the ultimate bearing capacity of the structure, PT in the bridge state for the structure of the self-weight and the sum of the operating live load, in fact K is the structure to reach the ultimate bearing capacity about the PT loading multiplier.

2.5. Structural dynamic response

The dynamic characteristics of the structure were analyzed, and the structural fundamental frequency was 0.422 Hz. The first-order frequency range of the pedestrian pace: 1.6~2.4 Hz in the vertical direction, and half of 0.6~1.2 Hz in the lateral direction, which is recommended by the European British Standard BS5400 and the German Standard to avoid the lateral vibration frequency of 0.5~1.2 Hz. According to the calculation results, this bridge is far from the possible resonance zone.

3. CONSTRUCTION

3.1. Construction scheme

The structure can be constructed by cable tower crane. This scheme can reduce the bridge construction risk and the stress change of the arch bridge during construction. Specific construction steps are as follows.

1) Foundation construction – foundation inspection and acceptance – erection of tower – buckling, sling and cable installation.

2) Steel structure factory acceptance – transportation of arch rib segments – assembly of arch rib segments.

Table 3
Arch bridge structure flexural stability characteristic value

Mode	Critical load factor	Working condition	Unstable mode
Mode 1	6.8	Constant load variable Other constant	Longitudinal asymmetry
Mode 2	8.2		Longitudinal symmetry
Mode 3	11.4		Symmetric distortion
Mode 1	36.7	Variable live load Other constant	Longitudinal asymmetry
Mode 2	43.0		Longitudinal symmetry
Mode 3	60.9		Symmetric distortion

Table 4
Dynamic characteristics analysis results

Vibration order	Period (s)	Frequency (Hz)	Description of key vibration characteristics
1	2.368	**0.422**	Arch rib transverse bend
2	1.648	0.607	Second-order vertical bend of arch beam
3	1.561	0.641	Arch rib second order transverse bend
4	1.150	0.870	Second-order symmetrical vertical bending of arch beam
5	1.001	0.992	Main beam first-order transverse bend
6	0.918	1.090	Third-order transverse bend of arch rib
7	0.716	1.397	Second order torsion of arch beam
8	0.648	1.546	Third-order torsion of arch beam

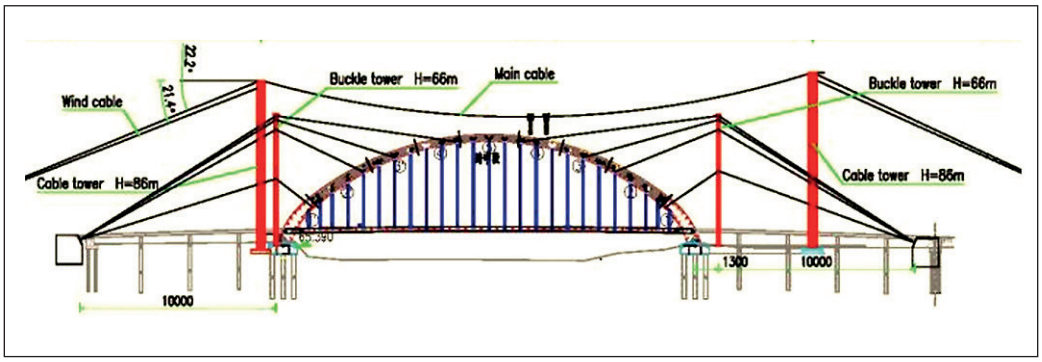

Fig. 9. **Construction layout of cable tower crane**

3) Lifting arch ribs section by section – tensioning temporary horizontal ties in batches – monitoring and surveillance – main arch alignment adjustment – closing and welding of main arch (final welding of arch foot and pre-buried steel plates) – main arch alignment acceptance.

4) Pumping C60 self-compacting concrete concrete filled steel tube – monitoring deformation of the main arch – detecting compactness and voids – epoxy resin patching to compactness – acceptance of the main arch.

5) Sling hanging longitudinal beam – longitudinal beam joint – through the vertical sling, progressive adjustment of the bridge deck line shape, so that the sling force is uniform, while the bridge deck line shape to meet the specification requirements; horizontal tie tension is large, should pay attention to the radial force generated by the vertical curve of the tie, should be attached to a certain lateral support.

6) Sling suspension crossbeam – crossbeam joints – batch tensioning temporary and permanent horizontal ties – adjust the deck alignment.

7) Cast-in-place bridge deck slab – laying bridge deck pavement – tensioning permanent horizontal ties in batches and symmetrically loosening the temporary horizontal ties.

8) Each construction stage needs to be in accordance with the loading procedure chart and monitoring data synchronous adjustment of the boom cable force, horizontal ties cable force.

9) In accordance with the city and highway bridge inspection specification requirements, static load, dynamic load test, completion acceptance.

3.2. Cable tower crane

The cable crane is composed of rope system, tower system, anchoring system, cable wind system, mechanical and electrical system, etc. When the site conditions are suitable, the cable tower and buckling tower are designed separately. The span of the cable crane covers the engineering lifting operation of the whole bridge. The whole bridge has 2 cable towers and 4 buckling towers. Buckle crane is separated, arch first and then beam, from side to middle, symmetrical installation.

3.3. Construction process analysis

The construction phase simulation analysis was carried out by Midas space program.

This calculation assumes that the arch ribs are assembled throughout the process and requires that for each section of arch ribs lifted, the tension of all buckling cables is adjusted during the unloading process of the main cables to ensure that all forces are uniform. When lifting each section of arch ribs, adjust the buckling cable tension corresponding to the section of arch ribs so that it can turn slightly near the design arch axis and the coordinates of the lifting point reach the predetermined height, and then fix the front end of the rib section with the last arch rib; when the whole arch ribs are pre-closed, readjust all the buckling cable tension so that the actual arch axis is as close as possible to the theoretical arch axis, requiring an error of ⩽ 5 mm.

To simplify the calculation process, the following assumptions are made: During the erection of the arch ribs, the foot of the arch is equipped with a rotating hinge and no additional bending moment is generated; The stiffness of each arch rib section is infinite with respect to the buckling cable and is regarded as a rigid body; It is assumed that the center of gravity of each arch rib section is located in the center of the longitudinal section; The influence of the wind cable on the buckling cable tension is not considered; The force generated by the closing section is borne by half of the buckling cable on each bank.

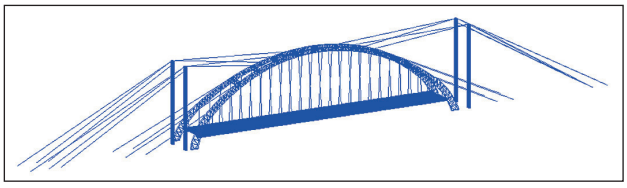

Fig. 10. **Construction calculation model**

Table 5
South shore snapping rope force change (kN)

	Withhold 1 (kN)	Withhold 2 (kN)	Withhold 3 (kN)	Withhold 4 (kN)
Section 1	254.3			
Section 2	275.9	402.0		
Section 3	262.6	394.6	769.5	
Section 4	235.0	374.7	637.5	1057.6
Section 5 (Closing section)	211.6	359.5	590.4	1068.3
Concrete	152.8	330.6	594.1	1092.9
Maximum cable force	275.9	402.0	769.5	1092.9
Vibration influence Factor 1.1	303.5	442.2	846.5	1202.2
Safety factor	6.02	4.13	4.32	3.04

Table 6
North shore snapping rope force change (kN)

	Withhold 1 (kN)	Withhold 2 (kN)	Withhold 3 (kN)	Withhold 4 (kN)
Section 1	253.4			
Section 2	274.5	433.8		
Section 3	260.7	425.7	787.0	
Section 4	232.7	405.4	667.7	1054.8
Section 5 (Closing section)	209.1	389.9	624.1	1062.8
Concrete	150.7	359.9	624.8	1084.4
Maximum cable force	274.5	433.8	787.0	1084.4
Vibration influence Factor 1.1	302.0	477.2	865.7	1192.8
Safety factor	6.05	3.83	4.22	3.06

The calculation shows that the maximum vertical displacement of the main arch during the construction phase is 156.6 mm, which is L/1341 and meets the requirements of the construction specification.

4. CONCLUSION

According to the design and research of the composite Nielsen arch bridge, composite with the analysis of various technical indicators, we can draw the following conclusions.

1) The arch axis consists of the suspension chain line in the middle section and the parabolic line at both ends, the arch axis and pressure line are partially deviated at the foot of the arch, the middle section is dominated by the pressure form of the arch, the two ends are closer to the rigid frame structure form of force, the overall scheme of the structure is reasonable.

2) Composite structure system Nielsen arch bridge is a thrust system, which has strong adaptability to geological conditions. Under the action of constant load, by adopting convergent arch footing, the horizontal thrust of arch

Table 7
Vertical displacement of each observation point of the main arch during construction (mm)

			1	2	3	4	5	Filled steel pipe
South Shore	G1	Displacement increment	–0.3	–8.6	3.3	8.1	7.0	15.7
		Cumulative displacement	–0.3	–8.9	–5.5	2.6	9.6	**25.3**
	G2	Displacement increment		–52.9	–0.8	20.0	12.4	–8.0
		Cumulative displacement		–52.9	–53.7	–33.7	–21.3	**–29.3**
	G3	Displacement increment			–0.3	10.3	–13.0	–49.5
		Cumulative displacement			–0.3	10.1	–3.0	**–52.5**
	G4	Displacement increment				0.5	–51.4	–79.4
		Cumulative displacement				0.5	–50.9	**–130.3**
North Shore	G5	Displacement increment	–0.3	–8.5	3.5	8.3	7.0	15.7
		Cumulative displacement	–0.3	–8.7	–5.3	3.0	10.0	**25.7**
	G6	Displacement increment		–52.9	–0.5	20.6	12.7	–8.2
		Cumulative displacement		–52.9	–53.4	–32.8	–20.1	**–28.3**
	G7	Displacement increment			0.0	10.8	–12.8	–49.7
		Cumulative displacement			0.0	10.8	–2.0	**–51.7**
	G8	Displacement increment				0.0	–51.2	–79.6
		Cumulative displacement				0.0	–51.3	**–130.8**
Closing section	G9	Displacement increment					–67.7	–88.8
		Cumulative displacement					–67.7	**–156.6**

footing is effectively reduced by 35.9%, which obviously saves the horizontal ties and engineering cost.

3) In order to give all by play to the mechanical properties of the steel-concrete composite material in both tension and compression, based on the principle of the standing value of the elastic potential energy of the structure, the convergent asymptotic curvature of the main arch axis in the foot section, the first-order derivative continuity condition of the suspension chain line and parabolic line in the arch axis at the transition point are innovatively proposed, and the composite arch axis general equation of the composite structure arch bridge is established to reduce the horizontal thrust of the main arch, improve the lateral stability, reduce the project cost, and improve the economic spanning capacity of the large span composite structure arch bridge is improved.

REFERENCES

1. Cai Shaohuai. The latest development of concrete filled steel tubular structure technology in China. *Journal of Civil Engineering*. 1999; 32(4): 16–26.

2. Fang Qinhan. Whhu Changjiang Bridge. *Journal of Huazhong University of science and technology (Urban Science Edition)*. 2000; 19: 1–4.

3. Qin Qhunquan. Construction technology of cable-stayed bridge with plate truss composite structure of Wuhu Changjiang Bridge. *Journal of Civil Engineering*. 2005; 38(9): 94–98.

4. Zhu Hongping, Tang Jiaxiang. Three-dimensional finite element model for dynamic analysis of cable-stayed bridge. *Journal of Vibration Engineering*. 1998; 12(1) 85–89.

5. Li Yong. *Theory and application of long-span steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2013.

6. Li Yong. *Wave truss composite structure bridge*. Science Press; 2015.

7. Zhu Shi-Feng. *Study of Geometric Shape Control and Closure Techniques of Multi-Span Continuous Rigid-Frame Bridge Structure* (Master Dissertation). Chongqing: Chongqing Jiaotong University; 2008.

8. Liu Yuqing. *Composite structure bridge.* Beijing: China communication press; 2005.

9. Cai Shaohuai. *Code for design and construction of concrete filled steel tubular structures.* Beijing: China Planning Press; 1992.

10. Jin Chengdi. *Prestressed concrete beam arch composite bridge – Design Research and Practice.* Beijing: China communication press; 2001.

11. Liu Chang-Guo, Yin Canbin. Analysis and Experimental Study on Jacking Force for High Temperature Closure of Con-rinuous Rigid-Frame Bridge. *Highway Engineering.* 2009; (10): 83–86.

12. Yin Can-bin, Wang Jie-jun, Tang Can. Algorithms for the Jacking Force of High-Temperature Closure of a Continuous Rigid-Frame Bridge. *Journal of Central South University of Forestry&Technology*. 2009; (1): 111–116.

13. Chen Yiyan. *Design and construction of prestressed concrete bridge with corrugated steel webs.* Beijing: China communication press;2009.

14. Zhou Qijing. *Design and Construction Manual of steel-concrete composite structure.* Beijing: China Architecture& Building Press; 1991.

15. Nie Jianguo. *Principle and example of steel-concrete composite structure.* Beijing: Science Press; 2009.

16. Chen Baochun. *Design and construction of concrete filled steel tubular arch bridge.* Beijing: China communication press; 2002.

17. Yi Shujun. Design of (88+160+88) m self anchored deck arch bridge over Shanghai Hangzhou Expressway on Shanghai Hangzhou Passenger Dedicated Line. *Railway Standard Design*. 2010; (5): 57–60.

18. Li Yong. *Research on space theory and application of long-span steel-concrete composite bridge.* Doctoral thesis of Huazhong University of science and technology; 2011.

19. Zhang Lianyan, Li Zhesheng, Cheng Maofang. *Concrete filled steel tubular space truss composite beam structure.* Beijing: China communication press; 2001.

20. Hui Zhou, Liu Zhao, Huang Xiaodong. Optimal design of three span deck prestressed concrete arch bridge. *Southeast University Newspaper.* 2007; (2): 296–300.

21. Xv Yong, Ma Tinglin, Chen Kejian. *Design of concrete filled steel tubular arch of Beipanjiang bridge on Shuibai Railway*. Beijing: China Railway Science; 2003.

22. Lin Tongyan, Burns Ned H. *Prestressed concrete structure design*. Beijing: China Railway Publishing House; 1983.

23. Chen Zhaoyuan, Zhao Guopan. *Guide for durability design and construction of concrete structures.* Beijing: China Construction Industry Press; 2004.

24. Zhou Nianxian. *Comparison and selection of bridge schemes.* Version 2. Shanghai:Tongji University Press; 1997.

25. He Pizhuang. *Bridge aesthetics*. Beijing: China communication press; 1999.

26. Chen Baochun, Sun Chao, Chen Youjie. Application and development of bridge Swivel Construction Method in China. *Highway transportation technology*. 2001; (2): 24–28.

27. Zhang Lianyan, Cheng Maofang, Tan Bangming. *Bridge Swivel Construction*. Beijing: China communication press; 2002.

28. Huang Qingwei, Chen Baochun. Design and construction of maegu bridge in Japan. *Fujian architecture*. 2005; (1): 58–62.

29. Zou Yi-song, Shan Rong-Siang. The Determination of Jacking Force for Closure of Continuous Rigid Frame Bridge. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*. 2006; (2):12-15.

30. Gu Anbang. *Bridge Engineering (upper and lower)*. China communication pres;2000.

31. Li Yong, Chen Yiyan, Nie Jianguo, Chen Baochun. *Design and application of steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2002. Version 1.

32. Fan Lichu. Bridge Engineering (Volume II). China communication press; 2001.

33. Li Shuqin, Sun Tianming. Research on calculation method of PBL shear members in steel-concrete composite box girder. *Highway*. 2010; 15(08): 64–66.

34. Zhou Keming, Li Xia. Cantilever truss structure under lateral force. *Engineering Mechanics*. 2007; 24(10): 66–40.

35. He Minjun. Design and construction of horizontal cable for continuous steel truss arch double cantilever erection. *Transportation Technol*ogy. 2006; 26(1): 62–65.

36. Zhong Shantong. *Prestressed steel structure*. Harbin: Harbin Institute of Technology Press; 1986.

37. Li Chuanxi, Xia Guiyun. Summary of static analysis of stay cable. *Central South Highway Project.* 2001; 2.

38. Hua Xiaoliang. *Nonlinear analysis of bridge structure.* Beijing: China communication press; 1997.

39. Liu Guangdong, Wang Jiejun. Decomposition form of geometric stiffness matrix of spatial beam element. *Journal of Hunan University*. 1992; 1.

40. Zhao Chao. P*rinciple of structural matrix analysis*. Beijing: People's Education Pres; 1982.
41. Meng Fanzhong. *Elastoplastic finite deformation theory and finite element method*. Beijing: Tsinghua university press; 1985.
42. Favre R., San Roman J. De Castro, The Arch: Enduring and Endaring. *Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge*. 19–21, Sept., Parie's France. 2001; 3–16.
43. Myroll F., Dibiagio E. Instrumentation for Monitoring the Skarnsunder Cable-stayed Bridge. *In: Jon Krokedorg, ed. Proceedings of the Third Symposium on Strait Crossing*. Rotterdam. 1994; 207-21.
44. Muria Vila D., Gomez R., King C.D. Dynamic Structural Properties of Cable Stayed Tam Pico Bridge. *Journal of Structural Engineering*. ASCE. 1991; 117(11): 3396–3416. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3396).
45. Wace AJB. Excavations at Mycenae: IX. The Tholos Tombs. *Annual of the British School at Athens*. 1923; (25): 283–402.
46. Boyd TD. The Arch and the Vault in Greek Architecture. *American Journal of Archaeology*. 1978; 82(1): 83–100.
47. Pont dell'Abbadia [DB]. Structurae.*Science and Technology*, 2006, 32 (1): 124–126.
48. Galliazzo Vittorio. *Iponti romani: Catalogue generale*. Vol.2. Treviso: Edizioni Canova; 1994.
49. Colin O'Connor. *Roman Bridges* (First Edition). London: Cambridge University Press; 1993.
50. Troyano LF. *Atlante Storico University Dei Ponti*. Palermo: Dario Flaccovio Editore; 2006.
51. Gorazd H. Schonheit und Konstruktion der zerstorten Alten Brücke über die Neretva in Mostar (1566–1993). *Beton-und Stahlbetonbau*. 1996; 19(1): 18–20.
52. Wang Guoding, Zhong Shengbin. *Arch Bridge*. China communication press; 1997.
53. Chen Z, Zhouj J, Tse KT. et al. Alignment control for a long span urban rail-transit cable-stayed bridge considering dynamic train loads. Sci. China Technol. Sci. 2016. 59, 1759–1770. Available from: https://doi.org/10.1007/s11431-016-0330-1

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Luojin Cao – engineer, senior engineer, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China, 281853271@qq.com

Nianqin Liu – engineer, senior engineer, Shenzhen Bridge Design and Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518043, China, 40425988@qq.com

Xiangyu Li – engineer, senior engineer, Shenzhen College of international Education, Shenzhen, Guangdong 518110, China, katherineli.0207@gmail.com

Wenming Que – engineer, senior engineer, Shenzhen Bridge Design and Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518043, China, 1290701515@qq.com

Yong Li – Dr. Sci. (Eng.), professor, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China, Liy2000@163.com

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 15.07.2022; approved after reviewing 19.08.2022; accepted for publication 30.08.2022.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Научная статья
УДК 691
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-282-293

CC BY 4.0

Проектирование и исследование Арочного моста Нильсена с полностью композитной конструкционной системой

Луоджин Цао[1], Няньцин Лю[3], Сянюй Ли[2], Вэньмин Кве[3], Юн Ли[1,*]

[1] Колледж гражданского и транспортного машиностроения, Шэньчжэньский университет, Шэньчжэнь, Гуандун 518060, Китай
[2] Шэньчжэньский колледж международного образования, Шэньчжэнь, Гуандун 518110, Китай
[3] Шэньчжэньский институт проектирования и исследований мостов, ООО, Шэньчжэнь, Гуандун 518043, Китай

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: Liy2000@163.com

АННОТАЦИЯ: Китай – «королевство» арочных мостов. В статье на основе применения принципа постоянной величины потенциальной энергии упругости конструкции представлено инновационное применение теории проектирования изгиба и сжатия композитного арочного моста, оптимизировано проектирование оси арки композитного структурного арочного моста и предложен метод проектирования и строительства средненесущего композитного Арочного моста Нильсена. Выполнен расчет средненесущего композитного Арочного моста Нильсена, определены его структурная прочность, жесткость и устойчивость с использованием метода конечных элементов. Путем моделирования параметров оси арки, сагиттального соотношения пролетов и сечения арки была принята к использованию сходящаяся композитная ось арки с цельным поперечным сечением, чтобы улучшить экономический потенциал пропускной способности Композитного арочного моста Нильсена и расширить диапазон применения арочного моста большого пролета для равнинных местностей или местностей с мягкими грунтами основания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полностью композитная конструкционная система, композитный арочный мост, заполненная бетоном стальная труба, Арка Нильсена, ось композитной арки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Луоджин Цао, Няньцин Лю, Сянюй Ли, Вэньмин Кве, Юн Ли. Проектирование и исследование Арочного моста Нильсена с полностью композитной конструкционной системой // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 282–293. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-282-293. – EDN: ICTMEE.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cai Shaohuai. The latest development of concrete filled steel tubular structure technology in China. *Journal of Civil Engineering*. 1999; 32(4): 16–26.
2. Fang Qinhan. Whhu Changjiang Bridge. *Journal of Huazhong University of science and technology (Urban Science Edition)*. 2000; 19: 1–4.
3. Qin Qhunquan. Construction technology of cable-stayed bridge with plate truss composite structure of Wuhu Changjiang Bridge. *Journal of Civil Engineering*. 2005; 38(9): 94–98.
4. Zhu Hongping, Tang Jiaxiang. Three-dimensional finite element model for dynamic analysis of cable-stayed bridge. *Journal of Vibration Engineering*. 1998; 12(1) 85–89.
5. Li Yong. *Theory and application of long-span steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2013.
6. Li Yong. *Wave truss composite structure bridge.* Science Press; 2015.
7. Zhu Shi-Feng. *Study of Geometric Shape Control and Closure Techniques of Multi-Span Continuous Rigid-Frame Bridge Structure* (Master Dissertation). Chongqing: Chongqing Jiaotong University; 2008.
8. Liu Yuqing. *Composite structure bridge.* Beijing: China communication press; 2005.

© Луоджин Цао, Няньцин Лю, Сянюй Ли, Вэньмин Кве, Юн Ли, 2022

9. Cai Shaohuai. *Code for design and construction of concrete filled steel tubular structures*. Beijing: China Planning Press; 1992.

10. Jin Chengdi. *Prestressed concrete beam arch composite bridge – Design Research and Practice*. Beijing: China communication press; 2001.

11. Liu Chang-Guo, Yin Canbin. Analysis and Experimental Study on Jacking Force for High Temperature Closure of Con-rinuous Rigid-Frame Bridge. *Highway Engineering*. 2009; (10): 83–86.

12. Yin Can-bin, Wang Jie-jun, Tang Can. Algorithms for the Jacking Force of High-Temperature Closure of a Continuous Rigid-Frame Bridge. *Journal of Central South University of Forestry&Technology*. 2009; (1): 111–116.

13. Chen Yiyan. *Design and construction of prestressed concrete bridge with corrugated steel webs*. Beijing: China communication press;2009.

14. Zhou Qijing. *Design and Construction Manual of steel-concrete composite structure*. Beijing: China Architecture& Building Press; 1991.

15. Nie Jianguo. *Principle and example of steel-concrete composite structure*. Beijing: Science Press; 2009.

16. Chen Baochun. *Design and construction of concrete filled steel tubular arch bridge*. Beijing: China communication press; 2002.

17. Yi Shujun. Design of (88+160+88) m self anchored deck arch bridge over Shanghai Hangzhou Expressway on Shanghai Hangzhou Passenger Dedicated Line. *Railway Standard Design*. 2010; (5): 57–60.

18. Li Yong. *Research on space theory and application of long-span steel-concrete composite bridge*. Doctoral thesis of Huazhong University of science and technology; 2011.

19. Zhang Lianyan, Li Zhesheng, Cheng Maofang. *Concrete filled steel tubular space truss composite beam structure*. Beijing: China communication press; 2001.

20. Hui Zhou, Liu Zhao, Huang Xiaodong. Optimal design of three span deck prestressed concrete arch bridge. *Southeast University Newspaper*. 2007; (2): 296–300.

21. Xv Yong, Ma Tinglin, Chen Kejian. *Design of concrete filled steel tubular arch of Beipanjiang bridge on Shuibai Railway*. Beijing: China Railway Science; 2003.

22. Lin Tongyan, Burns Ned H. *Prestressed concrete structure design*. Beijing: China Railway Publishing House; 1983.

23. Chen Zhaoyuan, Zhao Guopan. *Guide for durability design and construction of concrete structures*. Beijing: China Construction Industry Press; 2004.

24. Zhou Nianxian. *Comparison and selection of bridge schemes*. Version 2. Shanghai:Tongji University Press; 1997.

25. He Pizhuang. *Bridge aesthetics*. Beijing: China communication press; 1999.

26. Chen Baochun, Sun Chao, Chen Youjie. Application and development of bridge Swivel Construction Method in China. *Highway transportation technology*. 2001; (2): 24–28.

27. Zhang Lianyan, Cheng Maofang, Tan Bangming. *Bridge Swivel Construction*. Beijing: China communication press; 2002.

28. Huang Qingwei, Chen Baochun. Design and construction of maegu bridge in Japan. *Fujian architecture*. 2005; (1): 58–62.

29. Zou Yi-song, Shan Rong-Siang. The Determination of Jacking Force for Closure of Continuous Rigid Frame Bridge. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*. 2006; (2):12-15.

30. Gu Anbang. *Bridge Engineering (upper and lower)*. China communication pres;2000.

31. Li Yong, Chen Yiyan, Nie Jianguo, Chen Baochun. *Design and application of steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2002. Version 1.

32. Fan Lichu. Bridge Engineering (Volume II). China communication press; 2001.

33. Li Shuqin, Sun Tianming. Research on calculation method of PBL shear members in steel-concrete composite box girder. *Highway*. 2010; 15(08): 64–66.

34. Zhou Keming, Li Xia. Cantilever truss structure under lateral force. *Engineering Mechanics*. 2007; 24(10): 66–40.

35. He Minjun. Design and construction of horizontal cable for continuous steel truss arch double cantilever erection. *Transportation Technol*ogy. 2006; 26(1): 62–65.

36. Zhong Shantong. *Prestressed steel structure*. Harbin: Harbin Institute of Technology Press; 1986.

37. Li Chuanxi, Xia Guiyun. Summary of static analysis of stay cable. *Central South Highway Project*. 2001; 2.

38. Hua Xiaoliang. *Nonlinear analysis of bridge structure*. Beijing: China communication press; 1997.

39. Liu Guangdong, Wang Jiejun. Decomposition form of geometric stiffness matrix of spatial beam element. *Journal of Hunan University*. 1992; 1.

40. Zhao Chao. P*rinciple of structural matrix analysis*. Beijing: People's Education Pres; 1982.

41. Meng Fanzhong. *Elastoplastic finite deformation theory and finite element method*. Beijing: Tsinghua university press; 1985.

42. Favre R., San Roman J. De Castro, The Arch: Enduring and Endaring. *Proceedings of the Third International Conference on Arch Bridge*. 19–21, Sept., Parie's France. 2001; 3–16.

43. Myroll F., Dibiagio E. Instrumentation for Monitoring the Skarnsunder Cable-stayed Bridge. *In: Jon Krokedorg, ed. Proceedings of the Third Symposium on Strait Crossing*. Rotterdam. 1994; 207-21.

44. Muria Vila D., Gomez R., King C.D. Dynamic Structural Properties of Cable Stayed Tam Pico Bridge. *Journal of Structural Engineering*. ASCE. 1991; 117(11): 3396–3416. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3396).

45. Wace AJB. Excavations at Mycenae: IX. The Tholos Tombs. *Annual of the British School at Athens*. 1923; (25): 283–402.

46. Boyd TD. The Arch and the Vault in Greek Architecture. *American Journal of Archaeology*. 1978; 82(1): 83–100.

47. Pont dell'Abbadia [DB]. Structurae.*Science and Technology*, 2006, 32 (1): 124–126.

48. Galliazzo Vittorio. *Iponti romani: Catalogue generale*. Vol.2. Treviso: Edizioni Canova; 1994.

49. Colin O'Connor. *Roman Bridges* (First Edition). London: Cambridge University Press; 1993.

50. Troyano LF. *Atlante Storico University Dei Ponti*. Palermo: Dario Flaccovio Editore; 2006.

51. Gorazd H. Schonheit und Konstruktion der zerstorten Alten Brücke über die Neretva in Mostar (1566–1993). *Beton-und Stahlbetonbau*. 1996; 19(1): 18–20.

52. Wang Guoding, Zhong Shengbin. *Arch Bridge*. China communication press; 1997.

53. Chen Z, Zhouj J, Tse KT. et al. Alignment control for a long span urban rail-transit cable-stayed bridge considering dynamic train loads. Sci. China Technol. Sci. 2016. 59, 1759–1770. Available from: https://doi.org/10.1007/s11431-016-0330-1

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цао Луоджин – инженер, старший научный сотрудник, Колледж гражданского и транспортного машиностроения, Шэньчжэньский университет, Шэньчжэнь, Гуандун 518060, Китай, 281853271@qq.com

Лю Няньцин – инженер, старший научный сотрудник, Шэньчжэньский институт проектирования и исследований мостов, ООО, Шэньчжэнь, Гуандун 518043, 40425988@qq.com

Ли Сянюй – инженер, старший научный сотрудник, Шэньчжэньский колледж международного образования, Шэньчжэнь, Гуандун 518110, Китай, katherineli.0207@gmail.com

Кве Вэньмин – инженер, старший научный сотрудник, Шэньчжэньский институт проектирования и исследований мостов, ООО, Шэньчжэнь, Гуандун 518043, Китай, 1290701515@qq.com

Ли Юн – доктор технических наук, профессор, Колледж гражданского и транспортного машиностроения, Шэньчжэньский университет, Шэньчжэнь, Гуандун 518060, Китай, Liy2000@163.com

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы внесли равный вклад в эту статью.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 19.08.2022; принята к публикации 30.08.2022.

Review article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299

CC BY 4.0

Fillers for polymer composite materials

Aliya K. Mazitova, Ilnaz I. Zaripov*, Gulia K. Aminova, Maksim V. Ovod, Nina L. Suntsova
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
* Corresponding author: e-mail: ilnaz.zaripov1996@mail.ru

ABSTRACT: Introduction. For the production of building products made of PVC, compositions are used that, along with the polymer, include additives: plasticizers, stabilizers, modifiers. This leads to a decrease in the chlorine content in the composition and increases the flammability of the productitself. Therefore, nanoparticles of various fillers are added into the compositions. Fillers inPVC compositions (more often inorganic, less often organic substances) are solid additives that differ from the polymer matrix in chemical composition and structure.In most cases, the main function of fillers is to reduce flammability and cut costs of the products obtained, in some cases they serve to impart or improve the following properties: reducing plasticizer absorption, changing in dielectric properties, increasing rigidity and hardness, reducing noise transmission, reducing toxicity of combustion products. **Main part.** Fillers are classified according to various criteria. According to the state of aggregation, they are divided into gaseous, liquid and solid. By their nature, they are divided into organic and inorganic; according to the source of receipt – reinforcing, strengthening, reinforcing, neutral; bythe size, particle shape and structure – into 4 main types: dispersed (powder); fibrous (fibers, threads, bundles, etc.); sheet (film) with a given structure (fabrics, paper, tapes, sheets, films, nets); volumetric (framework) with a continuous three-dimensional structure (bulk fabrics, felt, skeletal and porous frameworks). The most commonly used solid fillers, which are also called dispersed. The introduction of dispersed fillers into polymer composite materials (PCM) is more appropriate for creating mass-produced materials, more technologically advanced, with a low level of strength characteristics. Dispersed fillers are introduced into thermoplastics with high fracture energy to reduce their cost, increase stiffness and compressive strength, and improve their technological characteristics during processing. At the same time, their tensile strength and impact strength decrease due to reduction in the proportion of polymer in the filled composition. The introduction of solid and hard particles leads to an increase in the elastic modulus (E); and soft, elastic or gaseous fillers – to its decrease. According to the mechanism of action, dispersed fillers can be divided into inert ones, which do not affect the properties of the matrix and are introduced into its composition to reduce the cost of the composition, and active ones. Dispersed fillers are divided into mineral, organic and metal. The commonest of those are minerals. **Conclusion.** Thus, at present, there are a large number of substances and materials used as fillers and making it possible to obtain PCM with low shrinkage and shape stability of products, high mechanical properties and the necessary set of special properties. Due to fillers, PCM can compete with other materials such as glass, ceramics and even metal in most areas of human activity.

KEYWORDS: fillers, nanoparticles, polymer composite materials, classification.

FOR CITATION: Mazitova A.K., Zaripov I.I., Aminova G.K., Ovod M.V., Suntsova N.L. Fillers for polymer composite materials. *Nanotechnologies in Construction.* 2022. Vol. 14, no. 4. p. 294-299. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299. – EDN: EKRDWM.

INTRODUCTION

At present, polyvinyl chloride (PVC) is one of the most common large-tonnage products in the global polymer industry [1]. PVC in its composition contains about 56% chlorine, so it belongs to polymers of low flammability and flammability. For the production of building products from PVC, compositions are used that, along with the polymer, include additives: plasticizers, stabilizers, modifiers [2, 3]. This leads to a decrease in the chlorine content in the composition and increases the combustibility of the product [4]. Therefore, nanoparticles of various fillers are added to the compositions. Fillers of PVC compositions (more often inorganic, less often organic substances) are solid additives that differ from the polymer matrix in chemical composition and structure. In most cases, the main function of fillers is to reduce flammability and reduce the cost of the products obtained; in some cases, they serve to impart or improve the following properties: reduced plasticizer absorption, changes in dielectric properties, increased rigidity and hardness, reduced noise transmission, reduced toxicity of combustion products [5–7].

© Mazitova A.K., Zaripov I.I., Aminova G.K., Ovod M.V., Suntsova N.L., 2022

MAIN PART

Classification of fillers

There are a number of approaches to the classification of fillers according to various characteristics (Fig. 1). According to the state of aggregation, all known fillers are divided into gaseous, liquid and solid. By their nature, they are divided into organic and inorganic; according to the source of receipt – reinforcing, strengthening, reinforcing, neutral; by size, particle shape and structure – into 4 main types: dispersed (powder); fibrous (fibers, threads, bundles, etc.); sheet (film) with a given structure (fabrics, paper, tapes, sheets, films, nets); volumetric (framework) with a continuous three-dimensional structure (bulk fabrics, felt, skeletal and porous frameworks) [8].

Gaseous fillers – various gases (nitrogen, hydrogen, ammonia, carbon dioxide, etc.), low-boiling hydrocarbons (pentane, isopentane, etc.), as well as organic and inorganic solids (ammonium carbonates, sodium carbonates, porophores, etc.) that foam the polymers. A porous structure can also be created in the course of physical processes leading to the appearance of a vapor-gas phase in the bulk of the polymer or chemical processes accompanied by the release of gaseous products. The content of blowing agents in the composition is usually 1–10% by weight of the polymer. Gas-filled plastics (foam plastics) are characterized by low density, good heat and sound insulation properties. As a result of filling with gas, light, heat, sound-proof, elastic and rigid foam plastics and foam plastics with specified damping properties are widely used in technology and in everyday life.

Liquid fillers are water and mineral oils [9]. Water is used in the production of rigid materials based on polyester resins. Mineral oils are used to maintain a lubricant layer on the friction surface.

Liquid-filled plastics are obtained by curing (cooling) stable emulsions in which the filler is the dispersed phase and the polymer is the dispersion medium.

As a rule, in filled polymer materials, the dispersed phase is a liquid, and the matrix is a polymer. Water, mineral oils, liquid lubricants, antiseptic and other substances are used as a liquid filler. Liquid-filled polymers are used to make fire-retardant screens, self-lubricating bearings, fragrances, and other materials.

The most commonly used solid fillers, which are also called dispersed.

Dispersive fillers

The most common type of fillers for polymer composite materials (PCM) are dispersed fillers of various nature. PCM containing dispersed fillers, which are evenly distributed in the material, as a rule, are characterized by an isotropy of properties, the optimum of which is achieved at a degree of filling that ensures the adsorption of the entire volume of the binder by the surface of the filler particles. With an increase in temperature and pressure, part of the binder is desorbed from the surface of the filler, due to which the material can be molded into products of complex shapes with brittle reinforcing elements. The dispersed filler reduces shrinkage during pressing, increases the rigidity and hardness of products made of composite materials (CM), and in some cases products acquire specific properties, such as arc resistance, electrical and thermal conductivity, resistance to electromagnetic and penetrating radiation, etc. Introduction to PCM dispersed fillers is more appropriate for creating mass-produced

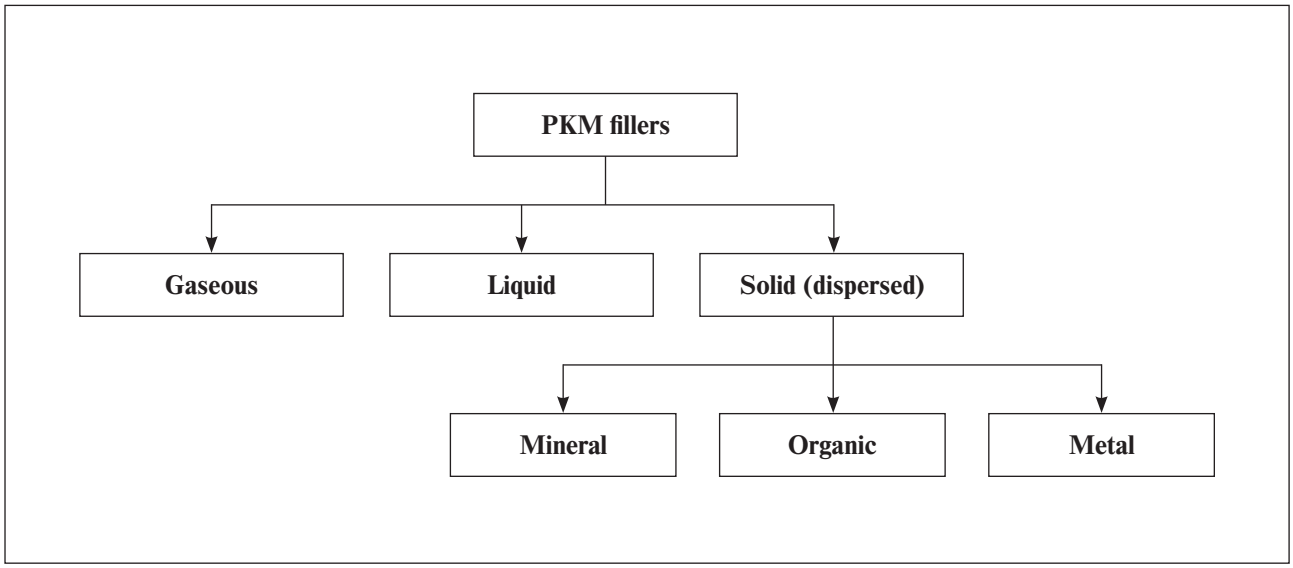

Fig. 1. **Main types of fillers**

materials, more technologically advanced, with a low level of strength characteristics. Dispersed fillers are introduced into thermoplastics with high fracture energy to reduce their cost, increase stiffness and compressive strength, and improve their technological characteristics during processing. At the same time, their tensile strength and impact strength decrease due to a decrease in the proportion of polymer in the filled composition. The introduction of solid and hard particles leads to an increase in the elastic modulus (E), and soft, elastic or gaseous fillers – to its decrease [10].

Among the most important requirements for dispersed fillers are the ability to combine with the polymer or disperse in it, good wettability by the melt or polymer solution, lack of tendency to agglomerate particles, uniformity of their size, and low humidity (as a rule, drying is necessary).

In addition, the type of binder also imposes certain requirements on the filler. Thus, when filling thermoplastics, fillers can have a catalytic effect on the curing process of the binder, and when filling thermoplastics, it is desirable that the filler particles have a rough surface for better adhesion to the matrix.

According to the mechanism of action, dispersed fillers can be divided into inert ones, which do not affect the properties of the matrix and are introduced into its composition to reduce the cost of the composition, and active ones. The activity of the filler is mainly determined by three factors:

- the ratio between the adhesion energy of the polymer to the filler, which can be increased by introducing active compounds into the binder, and the cohesive energy of the polymer;
- the degree of dispersion of the filler particles, which determines the surface area of the contact of the matrix with the filler and can be increased by grinding it;
- the amount of filler introduced, since even fillers that are considered inert in most sources (dolomite, marble, chalk, barite, etc.), at the so-called critical content, begin to affect the mechanical properties of the composite, for example, significantly reducing impact strength [11].

The activity of the filler can be increased by modifying its surface with compounds that give it or the binder additional properties or optimize their characteristics [12]. For example, to improve rheological properties and wetting, the chalk surface is often treated with stearic acid, calcium stearate, or coupling agents, which contributes to a better distribution of chalk particles in the polymer matrix [21]. When obtaining composite materials, inert and active fillers can be used simultaneously.

Active fillers include hydroxides of aluminum and magnesium. Aluminum hydroxide is used in the composition of plastics and many other materials, absorbs heat, suppresses combustion, adsorbs combustible gases, prevents heating and further decomposition of polymers, and reduces the combustibility of materials. Magnesium hydroxide is used as a flame retardant in the production of thermoplastics and polymer compositions. Magnesium hydroxide plays an important role in the production of non-flammable wires and cables (automobile and halogen-free cables), in the production of roofing sheets.

Dispersed fillers are divided into mineral, organic and metal. The most common of them are mineral [13].

Mineral (light) dispersive fillers

Mineral disperse fillers include: chalk, aerosil, white soot, aluminosilicates, as well as metal oxides and sulfates [14, 15].

Chalk is a white, odorless powdery substance, characterized by low hygroscopicity, it is an environmentally friendly non-toxic product, non-flammable, explosion-proof. As a filler, it is widely used in materials based on PVC (in rigid and plasticized formulations), polypropylene, polystyrene and its copolymers, in polyester fiberglass (premixes, prepregs). Chalk is also used in rubber compounds based on almost all general purpose rubbers as a cheap inert filler. It is well dispersed in rubbers of various types. Chalk-filled rubber compounds are characterized by high plasticity and good working properties.

Aerosil is a fine white dusting powder, non-flammable, explosion-proof, harmless and does not cause silicosis even at high concentrations. It is an expensive filler, so its use is advisable in rubbers with unique properties: it is mainly used in rubbers based on silicone rubbers. Aerosil-filled rubbers are characterized by high tear resistance, high relative elongation, wear resistance, high resistance to thermal aging, and good dielectric properties.

White soot is an amorphous non-toxic white powder, fire and explosion proof. It is used as a reinforcing filler for synthetic and polymeric materials in the tire, rubber, chemical, light and other industries. White carbon improves mechanical characteristics, increases heat resistance and fire resistance.

Kaolin is a powdered environmentally friendly, non-toxic product, from white to reddish color depending on the iron content, non-flammable, explosion-proof. Kaolin is used in the filling of thermoplastics to impart increased tensile modulus values, as well as to improve electrical properties, in the production of fiber-reinforced plastics based on polyester binders – to increase viscosity, as well as to increase volumetric electrical resistance and water resistance. It is also used as a semi-reinforcing filler for general purpose rubbers. Its introduction into rubber compounds leads to an increase in their viscosity, an increase in carcass and a decrease in shrinkage.

Diatomite is a natural aluminosilicate, is a soft rock, non-toxic, fire and explosion-proof. It is currently most

widely used as an antiblock additive in the production of low density polyethylene films. It is also used as a technological additive (absorbent) in highly oil-filled rubber compounds. The introduction of diatomaceous earth into rubber compounds increases their carcass and reduces shrinkage.

Bentonite is a natural layered aluminosilicate, non-toxic, fire and explosion-proof. Due to the active surface, bentonite is a good object for modification in order to direct changes in properties. It is used in rubber compounds of various hardness for the manufacture of molded products.

Talc is a natural mineral in the form of a soft, greasy to the touch white powder. The product is non-toxic and fireproof. It is most widely used as a filler for thermoplastics, primarily polypropylene (automotive, instrumentation). Talc-filled polymer compositions are characterized by higher rigidity and creep resistance. It is also used in the rubber industry mainly as a powdering material. To a lesser extent, it is used as a filler for rubbers, which are subject to increased requirements for rigidity, hardness, and dielectric properties. The introduction of talc into the elastomer increases the resistance to tear, thermal aging and provides low compression set.

Titanium dioxide is a white, odorless powder. Physiologically, it is safe, belongs to the fourth hazard class, fire and explosion proof. The widespread use of titanium dioxide as a white pigment in the polymer industry is due to the effective scattering of visible light: when the dispersion is introduced into the plastic mass, the effect of whiteness and opacity is created, and the brightness of the color is provided.

Zinc oxide is a white, slightly yellowish or gray odorless powder, belongs to the second hazard class, is fire and explosion safe. It is used as an activator for sulfur vulcanization of all diene rubbers, a vulcanizing agent for chloroprene rubbers. It is limitedly used as a heat-resistant and heat-conducting filler for light and dark rubbers.

Lithopone is a non-toxic and non-flammable white powder. It is used for pigmenting paints and varnishes based on any film-forming agents, it is especially suitable for water-dispersion paints, since it does not cause coagulation. Due to insufficient light and weather resistance of the coating, paints pigmented with lithopone are suitable for indoor use only. Lithopone is also used as a white pigment for the manufacture of colored rubbers and as a filler for acid-alkali-resistant rubbers.

Organic dispersive fillers

Organic particulate fillers include graphite, wood flour, coke, and soot.

Graphite is practically pure carbon, has high thermal and electrical conductivity, and is a good dry lubricant. It is widely used in polymer composites, alone or in combination with reinforcing fibres, as well as in various inorganic fillers and blends, e.g. mica, talc. Such composite materials with graphite include dry sliding, sealing properties (which are important in automotive and micro-mechanical parts and components).

Wood flour consists mainly of cellulose and lignin. When introduced into CMs, it improves their dimensional stability, tensile strength, and electrical insulating properties. Disadvantages (especially from hardwood) – low heat, moisture and chemical resistance.

Soot is a highly dispersed carbonaceous material formed during the incomplete combustion and thermal decomposition of hydrocarbons contained in natural or industrial gases and liquid products (oils) of petroleum and coal origin. The hardening effect of soot in CM is determined by its fineness, roughness, and specific activity. When introduced into PCM, it increases the dimensional stability, rigidity, heat resistance, thermal and electrical conductivity [16, 17].

Metal dispersive fillers

Metal powders have little effect on strength, but allow a wide range of changes in thermal and electrical conductivity, heat capacity, magnetic characteristics, electrical properties, as well as to give materials protection from electronic and penetrating radiation, change their density, combustibility, etc. Copper, aluminum, iron, bronze, tin, silver, lead, zinc are most often used as metal dispersed fillers. The surface of metal powders is often finished to increase adhesion and reduce moisture adsorption, and also covered with protective films (for example, in the form of a varnish layer) to exclude their influence on curing and degradation. A special group of metal-containing fillers are magnetic fillers. These fillers include oxide isotropic ferrites of barium and strontium, powders of alloys of rare earth metals with iron and boron ($Nd_2Fe_{11}B$), as well as binary alloys of samarium and cobalt ($CmCo_5$, $CmCo_{17}$) [18–20].

CONCLUSION

Thus, at present, there are a large number of substances and materials used as fillers and making it possible to obtain PCM with low shrinkage and shape stability of products, high mechanical properties and the necessary set of special properties. Due to fillers, PCM can compete with other materials such as glass, ceramics and even metal in most areas of human activity.

REFERENCES

1. Khrulev MV. *Polyvinylchloride*. Moscow: Chemistry; 1964. 264 p.

2. Jackson WI. Polymeric materials.*Advanced Chemistry*. 1965;(48): 185–189.

3. Maslova IP. *Chemical additives to polymers. Directory*. Moscow: Chemistry; 1981. 264 p.

4. Kopylov VV. *Polymeric materials with reduced flammability*. Moscow: Chemistry; 1986. 224 p.

5. Bondaletova LI, Bondaletov VG. *Polymer composite materials (part 1): study guide*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House; 2013. 118 p.

6. Kerber ML, Vinogradov VM, Golovkin GS. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*. St. Petersburg: Profession; 2008. 560 p.

7. Katz S, Milevsky D. *Fillers for polymer composite materials*. Moscow: Chemistry; 1981. 736 p.

8. Xanthos M. *Functional fillers for plastics*. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies; 2010. 28p.

9. Tugov II, Kostrykina GI. *Chemistry and physics of polymers*. Moscow: Chemistry; 1989. 432 p.

10. Ferricio TH. *Basic principles for the selection and use of dispersed fillers*. Moscow: Chemistry; 1981. 30 p.

11. Melnichenko MA, Ershova OV, Chuprova LV. Influence of the composition of fillers on the properties of polymer composite materials.*Young scientist*. 2015;(16): 199–202.

12. Ershova OV, Ivanovsky SK, Chuprova LV, Bakhaeva AN. Modern composite materials based on a polymer matrix. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2015;(4–1): 14–18.

13. Teryaeva TN, Kasyanova OV. Influence of the composition and properties of mineral fillers on the rheological characteristics of compositions.*Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2003; 32(1): 60–63.

14. Tutorsky IA, Pokidko BV. Elastomeric nanocomposites with layered silicates. Properties of nanocomposites. *Rubber and rubber*. 2004;(6): 33.

15. Arkhireev VP, Gotlib EM, Ibragimov MA, Naumov SV. Nanocomposites based on siloxane rubbers and layered silicates.*Bulletin of the Kazan Technological University*. 2010;(11): 514–518.

16. Kolosova AS, Sokolskaya MK, Vitkalova IA, Torlova AS, Pikalov ES. Fillers for the modification of modern polymer composite materials.*Fundamental research*. 2017;(10–3): 459–465.

17. Babich R. Fillers for polymers. *Polymers – money*. 2006;(3): 30–33.

18. Panova LG. *Fillers for polymeric composite materials*. Saratov: SGTU; 2010. 64 p.

19. Lipatov YuS. *Physical chemistry of filled polymers*. Moscow: Chemistry; 1977. 304 p.

20. Pakharenko VA, Zverlin VG, Kirienko EM. *Filled thermoplastics*. Kyiv: Technique; 1986. 182 p.

21. Ivanovsky SK. The use of dispersed fillers to create composite materials based on a polymer matrix. *Young scientist*. 2015; 95(15): 91–93.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aliya K. Mazitova – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Head of Applied and Natural Sciences Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, elenaasf@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2304-1692

Ilnaz I. Zaripov – Assistant, Applied and Natural Sciences Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, ilnaz.zaripov1996@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2051-831X

Gulia K. Aminova – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Applied and Natural Sciences Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, aminovagk@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-7830-9954

Maksim V. Ovod – postgraduate student of Building Constructions Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, Maxov001@ya.ru, https://orcid.org/0000-0003-4008-6294

Nina L. Suntsova – Cand. Sci. (Philol.), Assistant Professor of Foreign LanguagesDepartment, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, sunc-nina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1384-3598

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Aliya K.Mazitova – scientific management; final conclusions.

Ilnaz I. Zaripov – research concept; writing the draft; follow-on revision of the text.

Guliya K. Aminova – methodology development.

Maksim V. Ovod – collection of materials.

Nina L. Suntsova – participation in the development of the material.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 02.06.2022; approved after reviewing 21.06.2022; accepted for publication 27.06.2022.

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Обзорная статья
УДК 66.022.389
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299

CC BY 4.0

Наполнители для полимерных композиционных материалов

Алия Карамовна Мазитова, Ильназ Ильгизович Зарипов*, Гулия Карамовна Аминова, Максим Вадимович Овод, Нина Леонидовна Сунцова

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: ilnaz.zaripov1996@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Для производства изделий строительного назначения из ПВХ используются композиции, в которые наряду с полимером входят добавки: пластификаторы, стабилизаторы, модификаторы. Это приводит к снижению содержания хлора в композиции и повышает горючесть изделия. Поэтому в композиции добавляют наночастицы различных наполнителей. Наполнители ПВХ композиций (чаще неорганические, реже органические вещества) представляют собой твердые добавки, отличающиеся от полимерной матрицы химическим составом и структурой. В большинстве случаев основной функцией наполнителей является снижение горючести и удешевление получаемой продукции, в некоторых случаях они служат для придания или улучшения следующих свойств: снижение абсорбции пластификатора, изменение диэлектрических свойств, увеличение жесткости и твердости, снижение шумопроницаемости, снижение токсичности продуктов горения. **Основная часть.** Наполнители классифицируются по различным признакам. По агрегатному состоянию делятся на газообразные, жидкие и твердые. По своей природе они делятся на органические и неорганические; по источнику получения – на армирующие, упрочняющие, усиливающие, нейтральные; по размерам, форме частиц и структуре – на 4 основных вида: дисперсные (порошкообразые), волокнистые (волокна, нити, жгуты и т.д.), листовые (пленочные) с заданной структурой (ткани, бумага, ленты, листы, пленки, сетки), объемные (каркасные) с непрерывной трехмерной структурой (объемные ткани, войлок, скелетные и пористые каркасы). Чаще всего используются твердые наполнители, которые также называют дисперсными. Введение в полимерные композиционные материалы (ПКМ) дисперсных наполнителей более целесообразно для создания материалов массового производства, более технологичных, с невысоким уровнем прочностных характеристик. Дисперсные наполнители вводят в термопласты с высокой энергией разрушения для снижения их стоимости, повышения жесткости и прочности при сжатии и улучшения их технологических характеристик при переработке. При этом их прочность при растяжении и ударная вязкость снижаются вследствие уменьшения доли полимера в наполненной композиции. Введение твердых и жестких частиц приводит к повышению модуля упругости (E), а мягких, эластичных или газообразных наполнителей – к его снижению. По механизму воздействия дисперсные наполнители можно разделить на инертные, которые не оказывают влияния на свойства матрицы и вводятся в ее состав для удешевления композиции, и активные. Дисперсные наполнители подразделяются на минеральные, органические и металлические. Наиболее распространенные из них – минеральные. **Заключение.** Таким образом, в настоящее время существует большое количество веществ и материалов, применяемых в качестве наполнителей и позволяющих получать ПКМ с низкой усадкой и стабильностью формы изделий, высокими механическими свойствами и необходимым набором специальных свойств. За счет наполнителей ПКМ могут в большинстве сфер человеческой деятельности конкурировать с другими материалами, такими как стекло, керамика и даже металл.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наполнители, наночастицы, полимерные композиционные материалы, классификация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мазитова А.К., Зарипов И.И., Аминова Г.К., Овод М.В., Сунцова Н.Л. Наполнители для полимерных композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 294–299. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-294-299. – EDN: EKRDWM.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поливинилхлорид (ПВХ) является одним из самых распространенных многотоннажных продуктов в мировой полимерной промышленности [1]. ПВХ в своем составе содержит около 56% хлора, поэтому он относится к полимерам пониженной горючести и воспламеняемости. Для производства изделий строительного назначения из ПВХ используются композиции, в которые на-

© Мазитова А.К., Зарипов И.И., Аминова Г.К., Овод М.В., Сунцова Н.Л., 2022

ряду с полимером входят добавки: пластификаторы, стабилизаторы, модификаторы [2, 3]. Это приводит к снижению содержания хлора в композиции и повышает горючесть изделия [4]. Поэтому в композиции добавляют наночастицы различных наполнителей. Наполнители ПВХ композиций (чаще неорганические, реже органические вещества) представляют собой твердые добавки, отличающиеся от полимерной матрицы химическим составом и структурой. В большинстве случаев основной функцией наполнителей является снижение горючести и удешевление получаемой продукции, в некоторых случаях они служат для придания или улучшения следующих свойств: снижение абсорбции пластификатора, изменение диэлектрических свойств, увеличение жесткости и твердости, снижение шумопроницаемости, снижение токсичности продуктов горения [5–7].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Классификация наполнителей

Существует ряд подходов при классификации наполнителей по различным признакам (рис. 1). Все известные наполнители по агрегатному состоянию делятся на газообразные, жидкие и твердые. По своей природе они делятся на органические и неорганические; по источнику получения – на армирующие, упрочняющие, усиливающие, нейтральные; по размерам, форме частиц и структуре – на 4 основных вида: дисперсные (порошкообразые), волокнистые (волокна, нити, жгуты и т.д.), листовые (пленочные) с заданной структурой (ткани, бумага, ленты, листы, пленки, сетки), объемные (каркасные) с непрерывной трехмерной структурой (объемные ткани, войлок, скелетные и пористые каркасы) [8].

Газообразные наполнители – различные газы (азот, водород, аммиак, диоксид углерода и т.д.), низкокипящие углеводороды (пентан, изопентан и др.), а также твердые вещества органического и неорганического происхождения (карбонаты аммония, натрия, порофоры и т.д.), которые вспенивают полимеры. Пористая структура может создаваться и при протекании физических процессов, приводящих к возникновению в массе полимера парогазовой фазы или химических процессов, сопровождающихся выделением газообразных продуктов. Содержание порообразователей в композиции составляет обычно 1–10% от массы полимера. Газонаполненные пластмассы (пенопласты) характеризуются малой плотностью, хорошими тепло и звукоизоляционными свойствами. В результате наполнения газом – легкие, тепло, звукоизоляционные, эластичные и жесткие, с заданными демпфирующими свойствами пенопласты и поропласты, широко используемые в технике и в быту.

Жидкие наполнители – вода и минеральные масла [9]. Воду используют при получении жестких материалов на основе полиэфирных смол. Минеральные масла используют для сохранения слоя смазки на поверхности трения.

Пластмассы с жидким наполнителем получают отверждением (охлаждением) стабильных эмульсий, в которых наполнитель является дисперсной фазой, а полимер дисперсионной средой.

Как правило, в наполненных полимерных материалах дисперсной фазой является жидкость, а матрицей – полимер. В качестве жидкого наполнителя используют воду, минеральные масла, жидкие смазки, антисептические и другие вещества. Из полимеров, наполненных жидкостью, изготавливают огнезащитные экраны, самосмазывающиеся подшипники, ароматизирующие и др. материалы.

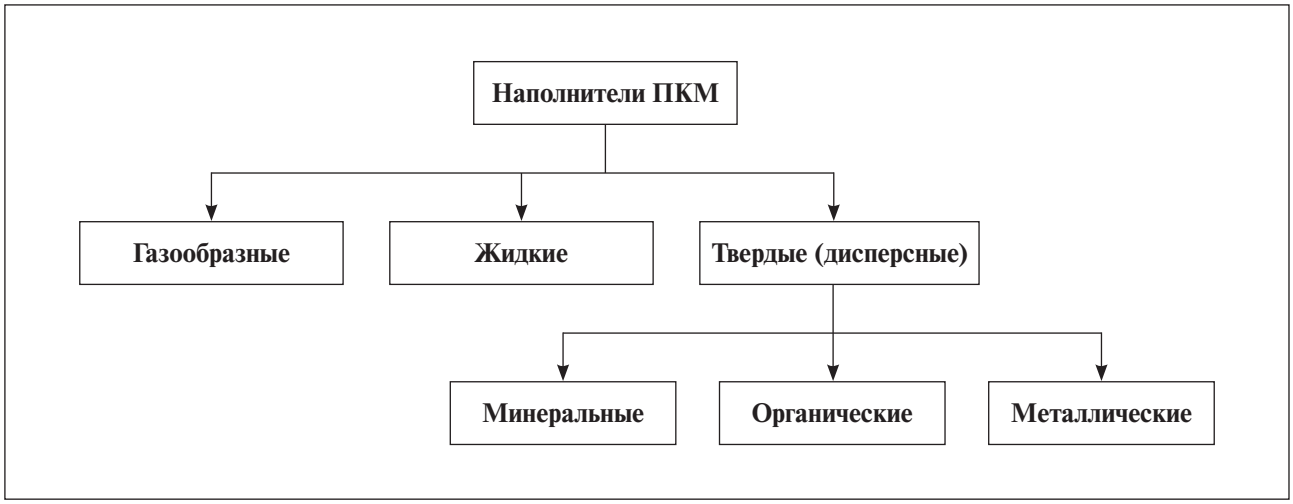

Рис. 1. **Основные виды наполнителей**

Чаще всего используются твердые наполнители, которые также называют дисперсными.

Дисперсные наполнители

Наиболее распространенный вид наполнителей для полимерных композиционных материалов (ПКМ) – это дисперсные наполнители различной природы. ПКМ, содержащие дисперсные наполнители, которые равномерно распределены в материале, как правило, характеризуются изотропией свойств, оптимум которых достигается при степени наполнения, обеспечивающей адсорбцию всего объема связующего поверхностью частиц наполнителя. При повышении температуры и давления часть связующего десорбируется с поверхности наполнителя, благодаря чему материал можно формовать в изделия сложных форм с хрупкими армирующими элементами. Дисперсный наполнитель уменьшает усадку при прессовании, повышает жесткость и твердость изделий из композиционных материалов (КМ), а в отдельных случаях изделия приобретает специфические свойства, например дугостойкость, электро- и теплопроводность, стойкость к действию электромагнитного и проникающего излучения и др. Введение в ПКМ дисперсных наполнителей более целесообразно для создания материалов массового производства, более технологичных, с невысоким уровнем прочностных характеристик. Дисперсные наполнители вводят в термопласты с высокой энергией разрушения для снижения их стоимости, повышения жесткости и прочности при сжатии и улучшения их технологических характеристик при переработке. При этом их прочность при растяжении и ударная вязкость снижаются вследствие уменьшения доли полимера в наполненной композиции. Введение твердых и жестких частиц приводит к повышению модуля упругости (E), а мягких, эластичных или газообразных наполнителей – к его снижению [10].

К числу важнейших требований, предъявляемых к дисперсным наполнителям, относятся способность совмещаться с полимером или диспергироваться в нем, хорошая смачиваемость расплавом или раствором полимера, отсутствие склонности к агломерации частиц, однородность их размера, а также низкая влажность (как правило, необходима сушка).

Кроме того, тип связующего предъявляет также определенные требования к наполнителю. Так, при наполнении реактопластов наполнители могут оказывать каталитическое действие на процесс отверждения связующего, а при наполнении термопластов желательно, чтобы частицы наполнителя имели шероховатую поверхность для лучшего сцепления с матрицей.

По механизму воздействия дисперсные наполнители можно разделить на инертные, которые не оказывают влияния на свойства матрицы и вводятся в ее состав для удешевления композиции, и активные. Активность наполнителя в основном определяется тремя факторами:

- соотношением между энергией адгезии полимера к наполнителю, которая может быть повышена путем введения в состав связующего активных соединений, и энергией когезии полимера;
- степенью дисперсности частиц наполнителя, которая определяет площадь поверхности контакта матрицы с наполнителем и может быть повышена путем его измельчения;
- количеством вводимого наполнителя, так как даже наполнители, считающиеся в большинстве источников инертными (доломит, мрамор, мел, барит и пр.), при так называемом критическом содержании начинают оказывать влияние на механические свойства композита, например, существенно снижая ударную вязкость [11].

Активность наполнителя может быть повышена модифицированием его поверхности соединениями, придающими ему или связующему дополнительные свойства или оптимизирующими их характеристики [12]. Например, для улучшения реологических свойств и смачивания поверхность мела часто обрабатывают стеариновой кислотой, стеаратом кальция или аппретами, что способствует лучшему распределению частиц мела в матрице полимера [21]. При получении композиционных материалов инертные и активные наполнители могут использоваться одновременно.

К активным наполнителям относятся гидроксиды алюминия и магния. Гидрооксид алюминия применяется в составе пластиков и многих других материалов, поглощает тепло, подавляет горение, адсорбирует горючие газы, исключает нагрев и дальнейшее разложение полимеров, снижает горючесть материалов. Гидроксид магния используется в качестве антипирена при производстве термопластов и полимерных композиций. Большую роль гидроксид магния играет в производстве негорючих проводов и кабелей (автомобильные и безгалогеновые кабели), в производстве кровельных листов.

Дисперсные наполнители подразделяются на минеральные, органические и металлические. Наиболее распространенные из них – минеральные [13].

Минеральные (светлые) дисперсные наполнители

К минеральным дисперсным наполнителям относятся: мел, аэросил, белая сажа, алюмосиликаты, а также оксиды металлов и сульфаты [14, 15].

Мел – порошкообразное вещество белого цвета без запаха, характеризуется малой гигроскопич-

ностью, является экологически безопасным нетоксичным продуктом, непожароопасен, взрывобезопасен. В качестве наполнителя находит широкое применение в материалах на основе ПВХ (в жестких и пластифицированных рецептурах), полипропилена, полистирола и его сополимеров, в полиэфирных стеклопластиках (премиксы, препреги). Также мел применяют в резиновых смесях на основе практически всех каучуков общего назначения в качестве дешевого инертного наполнителя. Он хорошо диспергируется в каучуках различных типов. Резиновые смеси, наполненные мелом, отличаются высокой пластичностью и хорошими рабочими свойствами.

Аэросил – тонкодисперсный пылящий порошок белого цвета, непожароопасен, взрывобезопасен, безвреден и не вызывает силикоза даже при высоких концентрациях. Является дорогостоящим наполнителем, поэтому его применение целесообразно в резинах с уникальными свойствами: в основном, его используют в резинах на основе силоксановых каучуков. Резины, наполненные аэросилом, характеризуются повышенным сопротивлением разрыву, высоким относительным удлинением, износостойкостью, высоким сопротивлением тепловому старению, хорошими диэлектрическими свойствами.

Белая сажа – аморфный нетоксичный белый порошок, пожаро- и взрывобезопасен. Она используется в качестве усиливающего наполнителя синтетических и полимерных материалов в шинной, резинотехнической, химической, легкой и других отраслях промышленности. Белая сажа улучшает механические характеристики, повышает теплостойкость и огнестойкость.

Каолин – порошкообразный экологически чистый, нетоксичный продукт, от белого до рыжего цвета в зависимости от содержания железа, непожароопасен, взрывобезопасен. Каолин применяется при наполнении термопластов для придания повышенных значений модуля упругости при растяжении, а также для улучшения электрических свойств, в производстве армированных волокнами пластиков на полиэфирных связующих – для повышения вязкости, а также для повышения объемного электрического сопротивления и водостойкости. Также он применяется в качестве полуусиливающего наполнителя каучуков общего назначения. Введение его в резиновые смеси приводит к повышению их вязкости, увеличению каркасности и уменьшению усадки.

Диатомит – природный алюмосиликат, представляет собой мягкую породу, нетоксичен, пожаро- и взрывобезопасен. В настоящее время наиболее широко используется в качестве добавки, препятствующей слипанию в производстве пленок из полиэтилена низкой плотности. Также он применяется как технологическая добавка (абсорбент) в высокомаслонаполненных резиновых смесях. Введение диатомита в резиновые смеси повышает их каркасность и снижает усадку.

Бентонит – природный слоистый алюмосиликат, нетоксичен, пожаро- и взрывобезопасен. Благодаря активной поверхности бентонит является хорошим объектом для модификации с целью направления изменения свойств. Применяется в резиновых смесях различной твердости для изготовления формовых изделий.

Тальк – природный минерал в виде мягкого, жирного на ощупь белого порошка. Продукт нетоксичен и пожаробезопасен. Наиболее широко применяется в качестве наполнителя термопластов, в первую очередь, полипропилена (автомобилестроение, приборостроение). Полимерные композиции, наполненные тальком, характеризуются более высокой жесткостью и сопротивлением ползучести. Также он применяется в резиновой промышленности в основном как опудривающий материал. В меньшей степени используется как наполнитель для резин, к которым предъявляются повышенные требования по жесткости, твердости и диэлектрическим свойствам. Введение в эластомер талька повышает сопротивление раздиру, тепловому старению и обеспечивает низкую остаточную деформацию при сжатии.

Диоксид титана – порошок белого цвета без запаха. Физиологически он безопасен, относится к четвертому классу опасности, пожаро- и взрывобезопасен. Широкое использование диоксида титана в качестве белого пигмента в полимерной промышленности обусловлено эффективным рассеиванием видимого света: при введении дисперсии в пластиковую массу создается эффект белизны и непрозрачности, обеспечивается яркость окраски.

Оксид цинка – белый, слегка желтоватый или серый порошок без запаха, относится ко второму классу опасности, пожаро- и взрывобезопасен. Применяется в качестве активатора серной вулканизации всех диеновых каучуков, вулканизующего агента хлоропреновых каучуков. Ограниченно применяется в качестве теплостойкого и теплопроводного наполнителя светлых и темных резин.

Литопон – нетоксичный и непожароопасный порошок белого цвета. Применяется для пигментирования лакокрасочных материалов на основе любых пленкообразователей, особенно пригоден он для водно-дисперсионных красок, так как не вызывает коагуляции. Из-за недостаточной свето- и атмосферостойкости покрытия, пигментированные литопоном краски пригодны к эксплуатации только внутри

помещений. Также литопон применяется в качестве белого пигмента для изготовления цветных резин и наполнителя кислотно-щелочестойких резин.

Органические дисперсные наполнители

К органическим дисперсным наполнителям относятся графит, древесная мука, кокс, сажа.

Графит – практически чистый углерод, имеет высокие тепло- и электропроводность, является хорошей сухой смазкой. Он широко используется в полимерных композитах, по отдельности или в сочетании с армирующими волокнами, а также в различных неорганических наполнителях и смесях, например, со слюдой, тальком. Такие композитные материалы с графитом включают в себя свойства сухого скольжения, уплотнения (которые важны в автомобильных и микро-механических запасных частях и комплектующих).

Древесная мука состоит в основном из целлюлозы и лигнина. При введении в КМ улучшает стабильность их размеров, прочность при растяжении, электроизоляционные свойства. Недостатки (особенно из древесины лиственных пород) – низкие тепло-, влаго- и химическая стойкость.

Сажа представляет собой высокодисперсный углеродистый материал, образующийся при неполном сгорании и термическом разложении углеводородов, которые содержатся в природных или промышленных газах и в жидких продуктах (маслах) нефтяного и каменноугольного происхождения. Упрочняющее действие сажи в КМ определяется дисперсностью, шероховатостью, удельной активностью. При введении в ПКМ увеличивает стабильность размеров, жесткость, теплостойкость, тепло- и электропроводность [16, 17].

Металлические дисперсные наполнители

Металлические порошки мало влияют на прочность, но позволяют в широких пределах изменять тепло- и электропроводность, теплоемкость, магнитные характеристики, электрические свойства, а также придавать материалам защиту от электронного и проникающего излучения, изменять их плотность, горючесть и т.д. В качестве металлических дисперсных наполнителей чаще всего используются медь, алюминий, железо, бронза, олово, серебро, свинец, цинк. Поверхность металлических порошков часто аппретируют для повышения адгезии и уменьшения адсорбции влаги, а также покрывают защитными пленками (например, в виде слоя лака), чтобы исключить их влияние на отверждение и деструкцию. Особой группой металлсодержащих наполнителей являются магнитные наполнители. К этим наполнителям относятся оксидные изотропные ферриты бария и стронция, порошки из легированных сплавов редкоземельных металлов с железом и бором ($Nd_2Fe_{11}B$), а также бинарные сплавы самария и кобальта ($CmCo_5$, $CmCo_{17}$) [18–20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящее время существует большое количество веществ и материалов, применяемых в качестве наполнителей и позволяющих получать ПКМ с низкой усадкой и стабильностью формы изделий, высокими механическими свойствами и необходимым набором специальных свойств. За счет наполнителей ПКМ могут в большинстве сфер человеческой деятельности конкурировать с другими материалами, такими как стекло, керамика и даже металл.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хрулев М.В. Поливинилхлорид. М.: Химия, 1964. 264 с.
2. Jackson W.I. Polymeric materials // Advanced Chemistry. 1965. (48): 185–189.
3. Маслова И.П. Химические добавки к полимерам. Справочник. М.: Химия, 1981. 264 с.
4. Копылов В.В. Полимерные материалы с пониженной горючестью. М.: Химия, 1986. 224 с.
5. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. 118 с.
6. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
7. Кац С., Милевски Д. Наполнители для полимерных композиционных материалов. М.: Химия, 1981. 736 с.
8. Ксантос М. Функциональные наполнители для пластмасс. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. С. 28.
9. Тугов И.И., Кострыкина Г.И. Химия и физика полимеров. М.: Химия, 1989. 432 с.

10. Ферричио Т.Х. Основные принципы выбора и использования дисперсных наполнителей. М.: Химия, 1981. 30 с.

11. Мельниченко М.А., Ершова О.В., Чупрова Л.В. Влияние состава наполнителей на свойства полимерных композиционных материалов // Молодой ученый. 2015. (16).199–202.

12. Ершова О.В., Ивановский С.К., Чупрова Л.В., Бахаева А.Н. Современные композиционные материалы на основе полимерной матрицы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. (4–1). 14–18.

13. Теряева Т.Н., Касьянова О.В. Влияние состава и свойств минеральных наполнителей на реологические характеристики композиций // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2003. 32 (1). 60–63.

14. Туторский И.А., Покидько Б.В. Эластомерные нанокомпозиты со слоистыми силикатами. Свойства нанокомпозитов // Каучук и резина. 2004. (6). 33.

15. Архиреев В.П., Готлиб Е.М., Ибрагимов М.А., Наумов С.В. Нанокомпозиты на основе силоксановых каучуков и слоистых силикатов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. (11). 514–518.

16. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. (10–3). 459–465.

17. Бабич Р. Наполнители для полимеров // Полимеры – деньги. 2006. (3). 30–33.

18. Панова Л.Г. Наполнители для полимерных композиционных материалов. Саратов: СГТУ, 2010. 64 с.

19. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 304 с.

20. Пахаренко В.А., Зверлин В.Г., Кириенко Е.М. Наполненные термопласты. Киев: Техника, 1986. 182 с.

21. Ивановский С.К. Использование дисперсных наполнителей для создания композиционных материалов на основе полимерной матрицы // Молодой ученый. 2015. 95(15). 91–93.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мазитова Алия Карамовна – доктор химических наук, профессор, заведующий каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, elenaasf@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2304-1692

Зарипов Ильназ Ильгизович – ассистент каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия,ilnaz.zaripov1996@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2051-831X

Аминова Гулия Карамовна – доктор технических наук, профессор каф. «Прикладные и естественнонаучные дисциплины», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, aminovagk@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-7830-9954

Овод Максим Вадимович – аспирант каф. «Строительные конструкции», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, Maxov001@ya.ru, https://orcid.org/0000-0003-4008-6294

Сунцова Нина Леонидовна – канд. филол. наук, доцент кафедры «Иностранные языки», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Республика Башкортостан, Уфа, Россия, sunc-nina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1384-3598

ВКЛАД АВТОРОВ

Мазитова А.К. – научное руководство; итоговые выводы.

Зарипов И.И. – концепция исследования; написание исходного текста; доработка текста.

Аминова Г.К. – развитие методологии.

Овод М.В. – сбор материала.

Сунцова Н.Л. – участие в разработке материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.06.2022; одобрена после рецензирования 21.06.2022; принята к публикации 27.06.2022.

WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Wuhan University of Technology (hereafter referred to as WUT) is a national key university under the direct administration of the Ministry of Education. It is one of the first batch of universities which have entered the national "211 Project" and the national "Double-Top" Plan for Promoting the Development of World-class Universities and Disciplines. WUT is jointly constructed by the Ministry of Education and the Ministry of Transport. It is also the largest university inside the Ministry of Education in talents cultivation for building materials, transportation and automobile, WUT has become an important base for the cultivation of high-level scientific talents and technological innovation for the three major industrial sectors.

The University has three main campuses, namely, the Mafangshan Campus, the Yujiatou Campus and the South Lake Campus, with a total occupying land area of 267 hectares. Currently, WUT has over 5,400 staff and faculty members, over 36,000 undergraduates, over 18,000 postgraduates and Ph.D. students and about 1,700 international students. It owns 25 academic schools, 4 National Technology Innovation Bases and 4 modern libraries with a collection of 3.2953 million books. Since 2000, WUT has been awarded 23 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, QS Asia University Rankings, U.S.News Best Global Universities Rankings and ShanghaiRanking’s Academic Ranking of World Universities.

Since the funding of New China, WUT has cultivated more than 600,000 senior professionals. Over the past decade, the first-time employment rate of graduates has remained above 95%, and about 55% of total employed graduates join the world's Top 500 enterprises and emerging industries.

Over the years, WUT has made rapid development by following the spirit of "Sound in Morality, Broad in Learning and Pursuing Excellence"; and the principle of "Take the students' cultivation as our essence, and take academic development as our priority";. The university focuses on the lofty ideal of building an excellent university to win worldwide recognition and admiration and exercises 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.

Introduction to MSE Discipline of Wuhan University of Technology

1. Briefs of WUT's MSE

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 Processingwas evaluated "Excel-

lence" 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").

2. Representative Achievements and Academics

Targeting the frontiers of global science and technology, and striving to fulfill the significant needs of the country, WUT's MSE has invested 1.25 billion RMB (190 million USD) in the past 5 years in 6 primary research areas, including green manufacturing of environmentally friendly building materials, key materials serving in extreme environments, high-performance energy conversion and storage materials, and frontiers of interdisciplinary materials science. The representative achievements and academics during 2016–2020 are briefed as follows:

(1) WUT's MSE has been granted over 330 national key projects, with a total fund of 1.2 billion RMB (185 million USD).

(2) WUT's MSE has won 5 national science and technology awards, and has published over 4000 papers, including 3 in Nature, 1 in Science, 46 in the sister journals of Nature, Science and Cell, 69 in Advanced Materials. Among these publications, 229 are highly cited or hot papers.

(3) Prof. Qingjie Zhang was elected as member of Chinese Academy of Sciences in 2017. Prof. Lianmeng Zhang was elected as member of Chinese Academy of Engineering in 2017. Prof. Zhengyi Fu was elected as member of Chinese Academy of Engineering in 2021. Profs.Liqiang Mai, Pei Cheng and Shaowen Cao were listed as Highly Cited Researchers by Clarivate Analytics in 2020.

3. Talents Cultivation and Representative Graduates

WUT's MSE aims at cultivating top-notch creative talents with exceptional pursuit and ability, international vision to lead the future development of materials science and materials industry. Currently, there are 5418 students in WUT's MSE, among which 673 are PhD students and 2289 are master students.

Prof. Ce-Wen Nan, PhD graduate in 1992, was elected as member of Chinese Academy of Sciences in 2011, is now director of Research Institute of MSE in Tsinghua University. Dr. ShouPeng, graduate in 1982, was elected as member of Chinese Academy of Engineering in 2019, is now chairman of the Advisory Committee of International Commission on Glass. Prof. Yi-Bing Cheng, graduate in 1983, was elected as fellow of the Australian Academy of Technology and Engineering in 2007. Prof. James ZhijianShen, graduate in 1978 and professor of Department of Materials and Environmental Chemistry at Stockholm University, was elected as member of the World Academy of Ceramics in 2017. Dr. Yuxian Zhou, graduate in 2003, is the president of China National Building Materials Group Corporation, a leading company in materials industry that ranks No. 187 in Fortune Global 500 in 2020. Dr. Yeqing Li, graduate in 1984, is the president of Huaxin Cement Co., Ltd., cradle of the Chinese cement industry.

4. Domestic and International Impacts

Prof. Qingjie Zhang, a member of Chinese Academy of Sciences, has been selected as member of the 1st National Basic Research Strategy Advisory Committee of the Ministry of Science and Technology since 2020, and panel chair of Major Research Plan of Materials Science

of the National Natural Science Foundation of China since 2019.

Prof. Qingjie Zhang received the 2017 Frontiers of Science and Technology – Rustum Roy Lecture Award from the American Ceramic Society, in recognition of his contribution to global energy challenges and developments of thermoelectric materials and systems in China. Prof. Zhengyi Fu, member of Chinese Academy of Engineering, received the Samuel Geijsbeek PACRIM International Award in 2019, for his contribution in the field of ceramics technology that has resulted in significant industrial and academic impact, international advocacy, and visibility of the field.Prof. Liqiang Mai received the Research Excellence Award in the International Conference on Electrochemical Energy Science and Technology in 2018, for his contribution in advanced in-situ characterization of single-nanowire devices for energy storage and conversion. Asso. Prof. Wei Ji, received the 2019 Ross Coffin Purdy Award from the American Ceramic Society in recognition of his contribution to ceramic technical literature in 2017.

16 world-recognized scholars, including 3 Nobel Laureates, have been appointed Lecturing Professors by WUT's MSE since 2016. Faculty members in WUT's MSE have collaborated with these scholars and obtained 19 key international cooperation research projects, as well as published 256 joint research papers in top-level journals including Nature and Science.

WUT's MSE has organized 13 high-level international conferences. Together with MSE of Tsinghua University, WUT's MSE hosted the 1st World University Forum on Materials Science and Engineering Leadership in 2019, and announced <Wuhan Declaration for the 21st Century Materials Science and Engineering Sustainable Development>. The representatives of this forum include heads of MSE of Northwestern University, UC Berkeley, UC Los Angeles, UC Irvine, Pennsylvania State University, Georgia Institute of Technology, University of Washington,University of Texas at Austin, University of Central Florida,University of Birmingham, University of Surrey, University of Lorraine, Monash University, Tohoku University, Seoul National University, National University of Singapore, Tel-Aviv University, Indian Institute of Technology – BHU, etc. from 15 countries (USA, UK, France, Australia, Japan, Korea, Singapore, Israel, India, etc.), deans of top 50 MSE schools in China, and presidents of 5 world material research societies (American Ceramic Society, European Ceramic Society, Ceramic Society of Japan, Korean Ceramic Society, and Colombian Materials & Minerals Society).

Overview of International School of Materials Science and Engineering

Driven by the great demand for national higher education reformation, the International School of Ma-

World University Forum on Materials Science & Engineering Leadership 世界大学材料科学与工程领导论坛

terials Science and Engineering (hereafter referred to as ISMSE), WUT is aimed to building the top-notch innovative talent training base and knowledge innovation centre of Materials Science and Engineering. In April 2014, ISMSE was founded and approved by the Hubei Provincial Department of Education. In June 2015, ISMSE was selected into the list of the "Network of International Centers for Education" supported by the MinistryofEducation of P. R. China and the Ministry of Science and Technology (former State Administration of Foreign Experts Affairs).

ISMSE is devoted toeducate a unique class of professional leaders in materials science and engineering who can push the boundaries of knowledge and technology to serve the needs of the nation and the world by providing students with a comprehensive curriculum, which is academically rigorous and provides students with vital skills of critical thinking, communication, team work and continuous learning, and also by exposing all students to meaningful international experiences, including lectures by distinguished visiting professors from different countries, short term visits to high level international universities and continuous engagement activities with international students. ISMSE has establishedthefirst Material Advantage Chapter in China in 2016.The chapter has won the Chapter of Excellence Award four times from 2018 to 2021, among 102 chapters all over the world.

ISMSE builds the platforms for academic exchanges and interdisciplinary promotions.The World University Forum on Materials Science and Engineering Leadership was held in October 2019 in Wuhan. More than 50 chairs of MSE department around the world attended the forum. It was the first global MSE forum and to discuss relevant issues and devise a strategy that provided the global MSE community with a blueprint for the future, which was announced as <Wuhan Declaration>.

State Key Laboratory of Advanced Technologyfor 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 GuBinglin, an academician of the Chinese Academy of Sciences, is the Chairof 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 thirtyrecipients 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 350.66 million RMB.

Introduction to Interdisciplinary Materials

The new scientific journal Interdisciplinary Materials (ISSN: 2767-441X) has been launched by Wuhan University of Technology and John Wiley & Sons, Inc in Dec, 2021. The first issue will be published in Jan, 2022 and the journal is free for publication in the first 3 years.

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 will include physicists, chemists, mathematicians, mechanics, biologists, and energy, environment, materials scientists, engineers from academia and industry as well as policymakers.

Interdisciplinary Materials invites you to submit high-quality, innovative full-length research articles, rapid communications, reviews, perspectives, comments, and other editorial content of general interest to the field of interdisciplinary materials.

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 (далее УТУ) – национальный стратегический университет под прямым управлением Министерства образования. Является одним из первых университетов, вошедших в государственные программы «211 Project» и »Double Top» для содействия развития университетов и дисциплин мирового уровня. УТУ был образован Министерством образования совместно с Министерством транспорта. Также является крупнейшим университетом при Министерстве образования по подготовке специалистов в области строительных материалов, транспорта и машиностроения. УТУ стал важным центром по выращиванию научно-технических кадров инновационных разработок для трех крупнейших сфер.

В университете расположены 3 кампуса – Мафангшан, Юдзитау и СауфЛейк, в общей сложности занимающих площадь 267 гектаров. В настоящее время в УТУ работает более 5400 человек персонала и факультетских сотрудников, более 36 000 студентов, свыше 18 000 аспирантов и выпускников и около 1700 международных студентов. Университету принадлежит 25 академических школ, 4 национальных технологических инновационных центра и 4 современных библиотеки с фондом в 32 953 миллионов книг. С 2000 года УТУ удостоился 23 государственных научных и технических премий, занимая первые позиции в рейтинге всех китайских университетов и колледжей. В 2019 году УТУ был внесен в рейтинги Times Higher Education World University Rankings, QSA sia University Rankings, U.S. News Best Global Universities Rankings и Shanghai Ranking & rsquos; Academic Ranking of World Universities.

С момента образования Нового Китая УТУ подготовил более 600 000 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 прошел огромное развитие, следуя девизу «быть нравственно непоколебимым, разносторонним в учении, стремящимся к совершенству», а также принципу «сделать воспитание студентов нашей сущностью, а академическое развитие – приоритетом». Университет фокусируется на высокой идее развития непревзойденного университета для завоевания всемирного признания и восхищения и воплощает образовательную концепцию «внедрение отличного образования, воспитание первоклассных кадров и создание прекрасной жизни». Руководствуясь Хартией УТУ, утвержденной Министерством образования, УТУ вовлечен в модернизацию правительственной системы с целью занять свое место среди университетов мирового уровня с отличительными признаками.

Знакомство с научным направлением материаловедения и инженерного дела в Уханьском технологическом университете

Краткое описание

Основанное в 1958 году в УТУ научное направление «Материаловедение и инженерное дело» (МИД) приоритетно поддерживалось государственной программой «211 проектов для университетов» в период с 1995 по 2015 годы, а с 2016 года поддержка стала осуществляться через план развития КНР «Университеты и научные дисциплины мирового уровня». Рейтинг этого направления составляет А+ среди 172 ведущих университетов в Китае (№1 наравне с направлением в университетах Тцинхуаи Бейхан) в 4-ом раунде, организованном Министерством образования в 2017 году, а также входит в топовый международный 1% в системе Clarivate Analytics' Essential Science Indicators.

В 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 член Австралийской академии технологий и инженерии, 10 членов Королевского химического общества, Американского общества физики и Американского общества керамики. Данное направление также включает 23 китайских высокопрофессиональных сотрудника, некоторые из которых являются стипендиатами национального фонда

National Natural Science Foundation of Chinafor Distinguished Young Scholars (аналогичен премии NSF Career Awards), и 22 китайских молодых специалиста.

Для содействия дисциплине были основаны 2 государственных лаборатории: Государственная стратегическая лаборатория передовых технологий для синтезирования и обработки материалов и Государственная стратегическая лаборатория силикатных материалов для архитектуры. Первая лаборатория получила оценку «превосходно» среди 21 государственных стратегических лабораторий 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 (известны как «111 Project»).

Значимые достижения и профессорско-преподавательский состав

Ставя целью покорить международную науку и технологии, а также желая удовлетворить масштабные потребности страны, за последние 5 лет инвестиции УТУ в рамках направления МИД составили 1,25 миллиардов юаней (190 миллионов долларов) в 6 основных областях исследований, таких как зеленое производство экологичных материалов, ключевые материалы, подверженные экстремальным условиям, высокопроизводительные энергопреобразующие и аккумулирующие материалы, а также в междисциплинарных областях материаловедения.

Репрезентативные достижения и профессорско-преподавательский состав за 2016–2020

Направление МИД получило гранты в более 330 национальных ключевых проектах, суммарное финансирование составило 1,2 миллиардов юаней (185 миллионов долларов).

Направление МИД выиграло 5 национальных научных и технологических премий, было опубликовано свыше 4000 научных работ, 3 из которых в журнале Nature, 1 в Science, 46 в дочерних журналах Nature, Science и Cell, 69 – в Advanced Materials. Среди данных публикаций 229 – высоко цитируемые работы.

Проф. Циндзи Джан был избран в члены Китайской академии наук в 2017. Проф. Лианмен Джан был избран в члены Китайской инженерной академии в 2017. Проф. Дженги Фу был избран в члены Китайской инженерной академии в 2021. Проф. Лициан Май, Пэй Чханги Шаовен Цхао были признаны самыми цитируемыми исследователями в системе Clarivate Analytics в 2020.

Подготовка высококвалифицированных кадров и известные выпускники

Специальность МИД направлена на подготовку специалистов высшего класса с исключительными компетенциями и международным видением будущего развития материаловедения и индустрии материалов. В настоящий момент на данной специальности обучаются 5418 студентов WUT's MSE, среди которых 673 – аспиранты и 2289 – студенты магистратуры.

Проф. Цхе-Вен Нан, получивший степень кандидата наук в 1992, был избран членом Китайской академии наук в 2011, в настоящий момент является директором Исследовательского института МИД в Университете Тцинхуа. Д-р Шоу Пханг, выпускник 1982 года, был избран в члены Китайской инженерной академии в 2019, сейчас является председателем Консультативного комитета Меж-

дународной комиссии по стеклу. Проф. И-Бинг Чханг, выпускник 1983года, был избран членом Австралийской академии технологий и инженерии в 2007 году. Проф. Джеймс Джидзиен Шен, выпускник 1978 года и профессор Департамента материалов и химии окружающей среды в Стокгольмском университете, был избран в члены Международной академии керамики в 2017 году. Д-р Юсиен Джоу, выпускник 2003 года, является президентом Китайского национального объединения строительных материалов, ведущей компании в индустрии материалов, занявшей 187 позицию в рейтинге Fortune Global 500 в 2020 году. Д-р Йецинг Ли, выпускник 1984 года, президент компании Huaxin Cement Co Ltd., являющейся, по сути, колыбелью китайской цементной индустрии.

Внутренние и международные контакты

Проф. Циндзи Джан, член Китайской академии наук, является членом Первого национального базового исследовательского стратегического консультативного комитета министерства науки технологий с 2020 года и председателем комитета Главного исследовательского плана материаловедения национального фонда естественных наук Китая с 2019 года.

Проф. Циндзи Джан получил в 2017 году премию Frontiers of Science and Technology – Rustum Roy Lecture Award от Американского общества керамики в знак признания его вклада в решение глобальных вызовов по энергетике и разработок термоэлектрических материалов и систем в Китае. Проф. Дженги Фу, член Китайской инженерной академии, получил международный приз Samuel Geijsbeek PACRIM в 2019 году за свой вклад в область керамических технологий, которые оказывают значительное влияние на промышленность и научную сферу, а также международную популяризацию. Проф. Лициан Май получила награду the Research Excellence на Международной конференции по электрохимической энергетике и технологиям в 2018 за свой вклад в перспективное локальное исследование однонанопроводных устройств для хранения и преобразования энергии. Доцент Вей Дзи получил в 2019 году награду Ross Coffin Purdy Award от Американского общества керамики за вклад в техническую литературу о керамике в 2017 г.

16 ученых с мировыми именами, включая 3 Нобелевских лауреата, стали профессорами специальности МИД в УТУ с 2016 г. Сотрудники факультета сотрудничали по программе МИД с указанными учеными и получили 19 ключевых международных совместных проектов, а также опубликовали 256 совместных научных работ в журналах высокого уровня, среди которых Nature и Science.

В рамках программы МИД были организованы 13 международных конференций высокого уровня. Совместно с Университетом Цинхуа по направлению МИД УТУ провел 1-ый Международный университетский форум по управлению материаловедением и инженерным делом в 2019 и аннонсировал «Уханьскую декларацию 21 века по развитию материаловедения и устойчивого строительства». Участниками данного форума были руководители направления МИД в университетах: Northwestern University, UC Berkeley, UC Los Angeles, UC Irvine, Pennsylvania State University, Georgia Institute of Technology, University of Washington,University of Texas at Austin, University of Central Florida,University of Birmingham, University of Surrey, University of Lorraine, Monash University, Tohoku University, Seoul National University, National University of Singapore, Tel-Aviv University, Indian Institute of Technology – BHU и др. из 15 стран (США, Великобритания, Франция, Австралия, Япония, Корея, Сингапур, Израиль, Индия и др.), деканы 50 ведущих научных школ по МИД из Китая и президенты 5 международных материаловедческих научных обществ (Американское общество керамики, Европейское общество керамики, Японское общество керамики, Корейское общество керамики и Колумбийское общество по материалам и минералам).

Обзор международных школ по материаловедению и инженерному делу

Для реализации необходимой реформы национальной системы высшего образования в апреле 2014 года в УТУ была основана и утверждена Департаментом образования провинции Хубэй Международная школа материаловедения и инженерного дела (МШМИД), которая должна стать базой подготовки высококвалифицированных специалистов и центра формирования инноваций по направлению МИД. В июне 2015 года МШ МИД была избрана для внесения в список «Сеть международных образовательных центров», поддерживаемая Министерством образования КНР и Министерством науки и технологий.

МШ МИД предназначена для обучения уникальных профессионалов-лидеров по материаловедению и инженерным наукам, которые могут изменить границы знаний и технологий для реализации потребностей страны и мира, обучая студентов по обширному и интенсивному учебному плану, предусматривающему развитие таких компетенций, как критическое мышление, коммуникативные способности, навыки командной работы и непрерывного обучения, а также путем вовлечения студентов в серьезный международный опыт, включающий лекции приглашенных профессоров из разных стран,

краткосрочные посещения университетов мирового уровня и постоянное взаимодействие с международными студентами.

Международная школа материаловедения и инженерного дела открыла первое отделение по достижениям в области материаловедения в Китае в 2016 году. С 2018 по 2021 год отделение четыре раза получало главную награду за выдающиеся достижения среди 102 отделений по всему миру.

МШ МИД строит платформы для академического обмена и междисциплинарных мероприятий. Международный университетский форум по управлению материаловедением и инженерным делом проводился в октябре 2019 года в Ухане. Более 50 кафедр по МИД со всего мира посетили форум. Он стал первым глобальным форумом по МИД, на котором обсуждались актуальные вопросы и стратегии, которые позволят глобальному сообществу понять будущий план развития, аннонсированный в Уханьской декларации.

Государственная стратегическая лаборатория передовых технологий для синтезирования и обработки материалов (Уханьский университет технологий)

Государственная стратегическая лаборатория передовых технологий для синтезирования и обработки материалов была утверждена Государственным комитетом планирования развития в 1987. После проведенной инспекции она открылась для общества в марте 1990 года. Лаборатория находится под управлением Министерства науки и технологий. В настоящий момент профессор Гу Биньлинь, академик Китайской академии наук, является председателем комиссии лаборатории, а профессор Фу Дженги, академик Китайской инженерной академии – директор академии. Лаборатория расположена в УТУ и является стратегической лабораторией, специализирующейся на новых материалах. Департамент материаловедения и инженерного дела в УТУ был определен как первоклассный в рейтинге State Key Discipline, вошедший в государственный «985» проект «Разработка программы научных дисциплин мирового уровня» и получил рейтинг A+ в 4 туре государственной оценки направлений. Ставя целью достичь мировой уровень исследований в области материаловедения и поддержать государственные интересы, данная лаборатория обеспечивает платформу для разработки новейших материалов и технологий, для развития передовых композитных материалов, необходимых в крупнейших национальных проектах и ведущих отраслях, а также для выполнения национальных стратегических задач. В лаборатории получены результаты уникальных и системных исследований, которые повлияли на общемировые преобразующие технологии, новые материалы и междисциплинарные области, и, таким образом, это привело мировое сообщество к открытию новых сфер для изучения материалов. Лаборатория активно готовит исследовательские кадры путем включения в научную работу. Более того, лаборатория обра-

World University Forum on Materials Science & Engineering Leadership 世界大学材料科学与工程领导论坛

зовала культуру международного инновационного сотрудничества и провела взаимовыгодное исследование, способствуя, таким образом, мировой значимости, привлекательности и сплоченной работе лаборатории. Лаборатория достигла исторического прорыва в оценке государственных стратегических лабораторий по материаловедению.

Основываясь на общей концепции и целях, лаборатория фокусируется на создании и развитии многокомпонентных, крупномасштабных и многоуровневых композитных принципах и теоретических обоснованиях разработки материалов, построенных на важнейших исследовательских платформах, включающих технологии градиентных композитов, композитные технологии на местах производства работ, нанокомпозиты и их сочетания. В настоящий момент в лаборатории проводятся исследования по 5 ключевым направлениям: новейшие композитные материалы для государственных крупных проектов и отраслей, эффективные энергопреобразующие и энергонакопительные материалы и технологии, нанокомпозитные биоматериалы для естественных наук, функциональные материалы для информационных технологий и передовые материалы для преобразовательных технологий. В связи с этим лаборатория определила 5 различных направлений: технологии градиентных композитов и новых материалов, композитные технологии на местах производства работ, нанокомпозитные технологии и материалы, преобразующие технологии, а также принципы проектирования и создания материалов. В лаборатории работает инновационная и активная команда исследователей, преимущественно состоящая из специалистов молодого и среднего возраста. Постоянный штат сотрудников включает одного члена Китайской академии наук, двух членов Китайской инженерной академии, одного академика Бельгийской королевской академии наук и искусств, двух академиков Австралийской академии технологий и инженерного дела, одного члена Международной академии керамики, двенадцать научных сотрудников национального уровня, одного ведущего научного сотрудника программы «973», пять стипендиатов национального фонда «Outstanding Youth Science Fund» и тридцать стипендиатов национального фонда «National Talent Support Plan» и др. Лаборатория активно поддерживает выдающихся ученых в посещении и проведении совместных научных работ в ведущих университетах и институтах по всему миру. В течение последних нескольких лет лаборатория направила несколько талантливых ученых в различные ведущие университеты для выполнения совместных исследований сроком более чем на 1 год.

Лаборатория уделяет особое внимание международному академическому обмену и сотрудничеству. За последние 5 лет было нанято 25 ученых с мировым именем и созданы комфортные рабочие условия для проведения исследований.

Также лаборатория взаимовыгодно сотрудничала со следующими организациями: University of Michigan; Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA); the Institute for Materials Research, Tohoku University (Япония); the Materials Research Center, University of Oxford (Великобритания); Composites Research Center, the University of California (США); the National Institute of Fuel Cells (Канада) и другими знаменитыми исследовательскими центрами и институтами.

Министерство науки и технологий основало «Международную совместную лабораторию передовых технологий для синтеза и обработки материалов», которая входит в первые тридцать три международных совместных лабораторий Китая. Более того, Государственное управление по делам иностранных экспертов и Министерство образования вместе основали три направления, поддержанных Програм-

мой развития инноваций и кадрового потенциала: «Новые технологии композитных материалов и новейших функциональных материалов», «Новейшие подготовительные технологии и прикладное проектирование новых функциональных пленочных материалов» и «Инновационное и кадровое обеспечение of Life композитов». Опираясь на эти важнейшие платформы, лаборатория получила государственные ключевые проекты с международным участием и достигла существенных результатов в международном сотрудничестве и обмене.

В настоящий момент лаборатория обладает площадью 25350 квадратных метров, с передовым оборудованием для синтеза и обработки материалов, а также современными инструментальными средствами для анализа структуры материалов, изучения их характеристик и тестирования эксплуатационных качеств. Общая стоимость оборудования составляет примерно 350,66 миллионов юаней.

Знакомство с журналом «Междисциплинарные материалы»

Новый научный журнал «Междисциплинарные материалы» (Interdisciplinary Materials) (ISSN: 2767-441X) был основан УТУ издательством «John Wiley & Sons, Inc» в декабре 2021. Первый выпуск был в январе 2022, и в первые три года публикации в нем будут бесплатны.

«Междисциплинарные материалы» является открытым, рецензируемым и быстропубликуемым журналом, ориентированным на междисциплинарные исследования на стыке материаловедения и других научных областей, таких как физика, химия, математика, механика, биология, энергия, экология, информатика, инженерное искусство и др. Цель журнала — публикация новейших достижений в науке и технике во всем мире.

Ожидается, что «Междисциплинарные материалы» воплотит междисциплинарный и системный подходы в изучении материалов для обеспечения обмена научными достижениями между специалистами из различных областей. Читательская аудитория будет включать физиков, химиков, математиков, специалистов по механике, биологии, энергетике, экологии, материаловедению, инженеров из академических и отраслевых структур, а также представителей государственной власти.

«Междисциплинарные материалы» приглашает Вас подавать качественные, содержащие научную и практическую новизну статьи, а также рецензии, обзоры, отклики и другой содержательный контент, представляющий интерес в сфере междисциплинарных материалов.

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

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318

CC BY 4.0

Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction

Zhangazy N. Moldamuratov[1, 4*], Raikhan S. Imambayeva[1], Nurlan S. Imambaev[2], Altaiy A. Iglikov[3], Sagyntai Zh. Tattibayev[3]

[1] International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan
[2] Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan
[3] M.Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz, Kazakhstan
[4] LLP «Expertise of earthquake-resistant construction», Taraz, Kazakhstan

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

ABSTRACT: Introduction. Research of polymer concrete properties show that it differs favorably from conventional concrete by such indicators as mechanical strength, resistance to aggressive impact of various environments, water resistance, abrasion resistance, water-repellency and frost resistance. Currently, it is possible to obtain polymer concrete with characteristic and chemical properties –specified density, strength, deformability, ductility, and corrosion resistance. **Methods and materials.** The research is carried out by comparing laboratory tests of polymer concrete based on furfural binder. Furfural has a high reactivity and can form resin compounds with many chemicals. Diphenylamine was added to furfural in different proportions. Benzenesulfonic acid, sulfuric acid and their mixture at a ratio – 1:1 by weight were used as hardeners. Crushed sand or ground andesite based on nanostructured microfiller served as aggregate for various compositions of polymer solutions. The polymer concrete strength, chemical resistance, lasting properties, water resistance, abrasion resistance, metal adhesion were tested during the research. Structural changes in properties were studied by the electron microscopic analysis method. **Results and discussion.** It is established that the diphenylamine solution in furfural, provided that it is solidified by sulfuric acid, benzolsulfoacid or mixture of these acids, is a polymer binder capable to form a high-strength material under normal hardening conditions by acid-resistant aggregates. It is also determined that to prepare resin, the ratio of furfural and diphenylamine should be within 1:0.5–0.3 by weight. The resin containing 1 weight part (w.p.) of furfural and 0.5 weight part of diphenylamine is conventionally named FD-1; containing 1 weight part of furfural and 0.4 weight part of diphenylamine – FD-2 and resin with 0.3 weight part of diphenylamine – FD-3. **Conclusion.** The introduction of nanostructured microfiller into the polymer concrete composition could save expensive resin. Comparison of the technologies for producing FD resin and polymer concrete, as well as preliminary test data of the studied materials, can determine the possible technical and economic advantages of polymer concrete based on FD resin over the polymer concrete based on FA (furfurolacetone) monomer which is currently used in construction of hydro-engineering structures. Polymer concrete based on FD resin has high strength and exceeds the strength of polymer concrete based on FA monomer by 20–25%.

KEYWORDS: polymer concrete, furfural, diphenylamine, resin, nanostructured microfillers, polymer solution, hydro-engineering structures.

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was financially supported by Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan in the framework of the scientific project № AP13268964.

FOR CITATION: Moldamuratov Zh.N., Imambayeva R.S., Imambaev N.S., Iglikov A.A., Tattibayev S.Zh. Polymer concrete production technology with improved characteristics based on furfural for use in hydraulic engineering construction. *Nanotechnologies in Construction.* 2022; 14(4): 306-318. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318. – EDN: JOZNEX.

INTRODUCTION

In hydro-engineering construction, polymer concrete can be used in the building of the individual parts of structures (overflow surface, dampers, etc.) that are subject to intensive destruction. This material is laid on a number of hydraulic structures in Central Asia and Kazakhstan [1].

© Moldamuratov Zh.N., Imambayeva R.S., Imambaev N.S., Iglikov A.A., Tattibayev S.Zh., 2022

Fig. 1. **Overflow surface of the Karaspan hydraulic complex**

A survey of the Karaspan hydraulic complex in the Turkestan region of the Republic of Kazakhstan, where the overflow surface is made of polymer concrete by volume 575 m^3 showed that after many years of operation the overflow surface did not collapse (Fig. 1).

The main reason that delays the widespread use of polymer concrete in the hydraulic structures construction is its high cost, the lack of acceptable manufacturing technology, and insufficient knowledge of its properties, which differ significantly from those of conventional concrete [2, 3]. The main rise in price falls on the cost of a synthetic binder, the most common and cheapest of which is resin – furfural acetone FA monomer. The cost of 1 m^3 of polymer concrete made on FA monomer is 2.5–3 times more expensive than reinforced concrete and 4–5 times more expensive than conventional cement concrete. The high cost of the polymer binder is due not only to the high cost of chemical products it is obtained from, but also to the high costs of manufacturing technological operations [4, 5].

Research conducted on furfural resin makes it possible to develop a low-cost technology to obtain binders for polymer concrete. Furfural has a high reactivity and can form resin compounds with many chemicals under fairly simple conditions (normal pressure and low temperatures). An example of this is the production of furfurolaniline resin, as well as the manufacture of other resin products by the interaction of furfurol with aromatic amines and their derivatives. However, the problem of obtaining an economical polymer binder will be solved only if the resin product obtained under simple manufacturing conditions can provide the required qualities of construction products (sufficient strength, durability) [2–5].

In the laboratory of building materials, the authors obtained the polymer binder based on furfural and aromatic amine-diphenylamine. It is established that the diphenylamine solution in furfural, provided that it is solidified by sulfuric acid, benzolsulfoacid or mixture of these acids, is the polymer binder capable to form a high-strength material under normal hardening conditions by acid-resistant aggregates.This polymer binder is called FD resin. In this case, the manufacturing costs will consist of the cost of the initial products [4–6].

METHODS AND MATERIALS

The optimal binder composition was determined as follows. Diphenylamine was added to furfural in different proportions. The mixture was mixed. The product in furfural was dissolved under normal conditions and a resin-like substance was formed. Polymer concrete samples, cubes 3×3×3 cm in size, were made based on the binder, while three types of hardener were used – benzenesulfonic acid, sulfuric acid and a mixture of them at a ratio of 1:1 by weight. The aggregate was ground andesite. After storage for a certain period of time at room temperature or in a drying oven, the hardened samples were tested for strength [7].

Experiments have shown that the ratio of furfural and diphenylamine should be in the range of 1:0.5–0.3 by weight to prepare resin. The resin containing 1 weight part of furfural and 0.5 weight part of diphenylamine is conventionally named FD-1; containing 1 weight part of furfural and 0.4 weight part of diphenylamine – FD-2, and resin with 0.3 weight part of diphenylamine – FD-3. These kinds of resin were used to make polymer-soluble cube-shaped samples of 3×3×3 cm. Each polymer-soluble mixture contained 20% FD resin. These mixtures were solidified by various amounts of sulfuric acid, benzolsulfoacid (BSA) and a combined hardener [7–9].

Solidified samples formed from polymer-soluble mixtures were tested for compression after 28 days storage at room temperature (Fig. 2). The test results allowed us to determine the most optimal compositions of polymer concrete. The test data of the samples are shown in Fig. 3, 4, 5.

The maximum strength of polymer solutions solidified by various hardeners is obtained from the following formulations:

I. Aggregate – ground andesite – 1 w.p.; binder – 0.2 w.p., FD-1 resin; hardener – 0.06 w.p., sulfuric acid; the compression strength is 1270 kg/cm^2 (Fig. 3).

II. Aggregate – ground andesite – 1 w.p.; binder – 0.2 w.p., FD-2 resin; hardener – 0.1 w.p., BSA; the compression strength is 1220 kg/cm^2 (Fig. 4).

Fig. 2. **Compression test of samples**

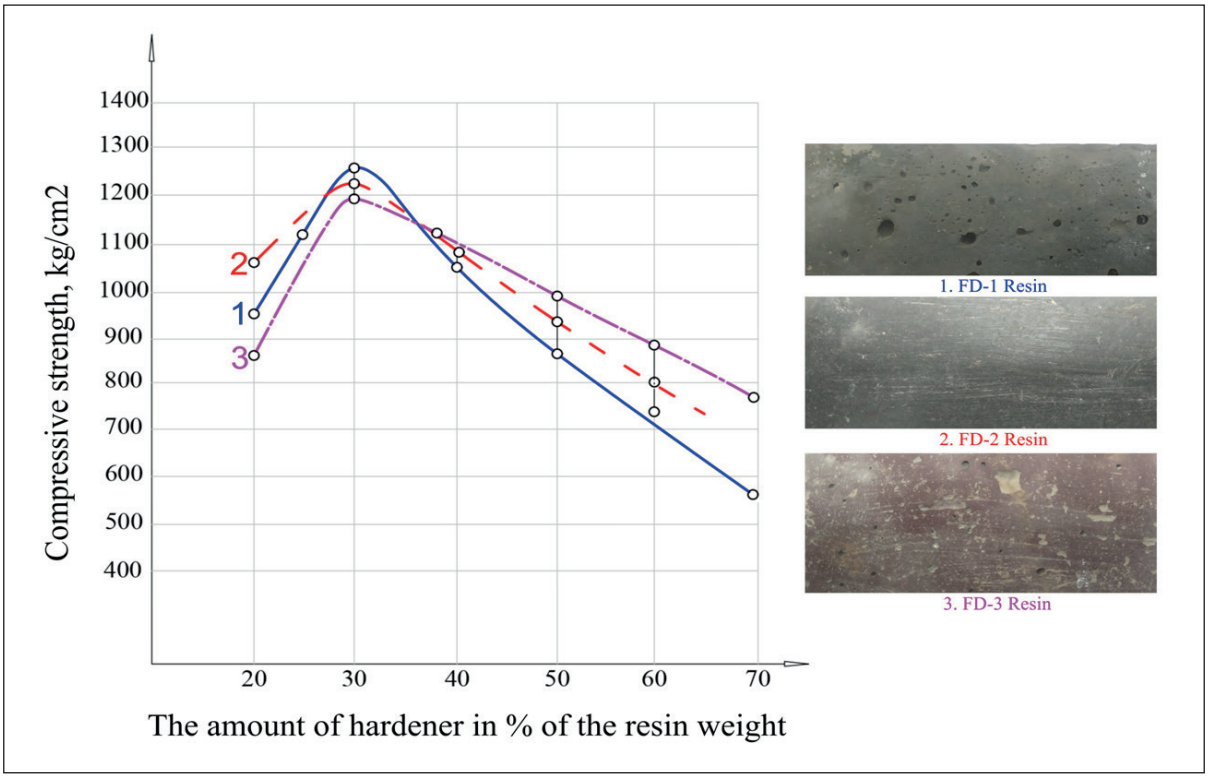

Fig. 3. **Changes in the strength of polymer concrete based on different kinds of resin depending on the amount of hardener-concentrated H_2SO_4:** FD-1 resin; FD-2 resin; FD-3 resin

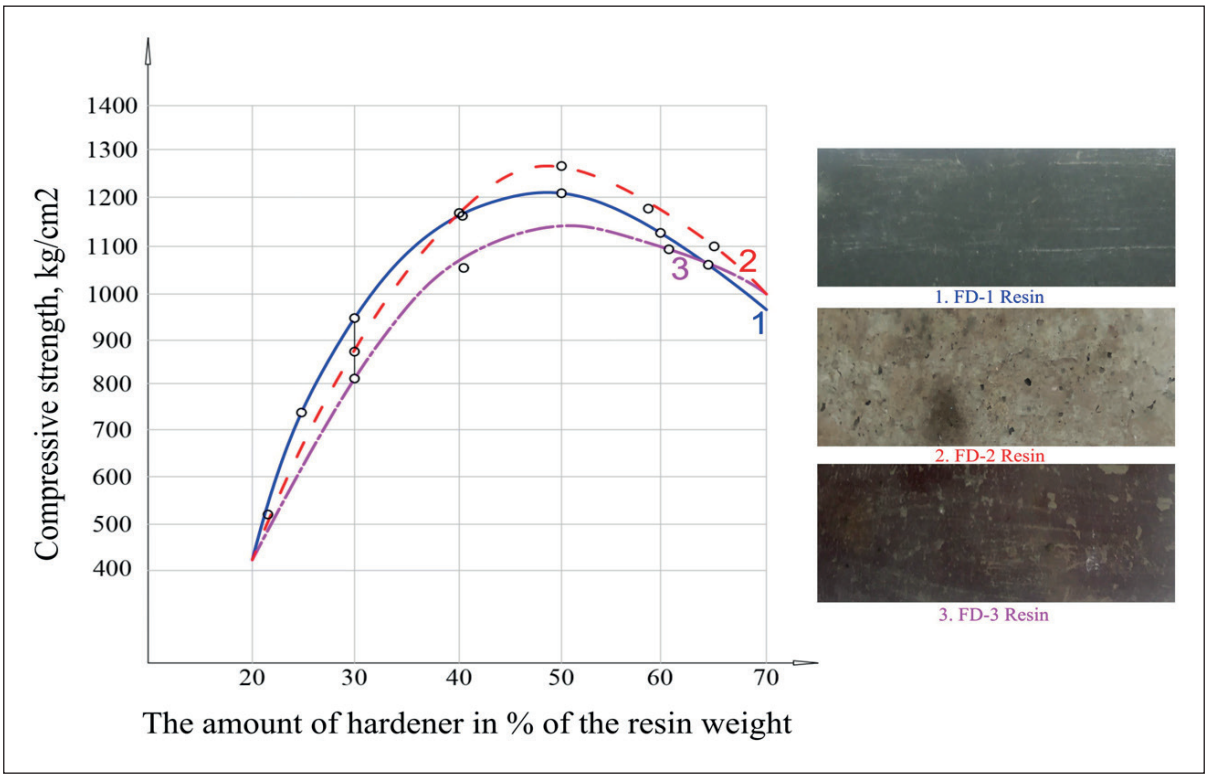

Fig. 4. **Changes in the strength of polymer concrete based on different kinds of resin depending on the amount of hardener-benzolsulfoacid:** FD-1 resin; FD-2 resin; FD-3 resin

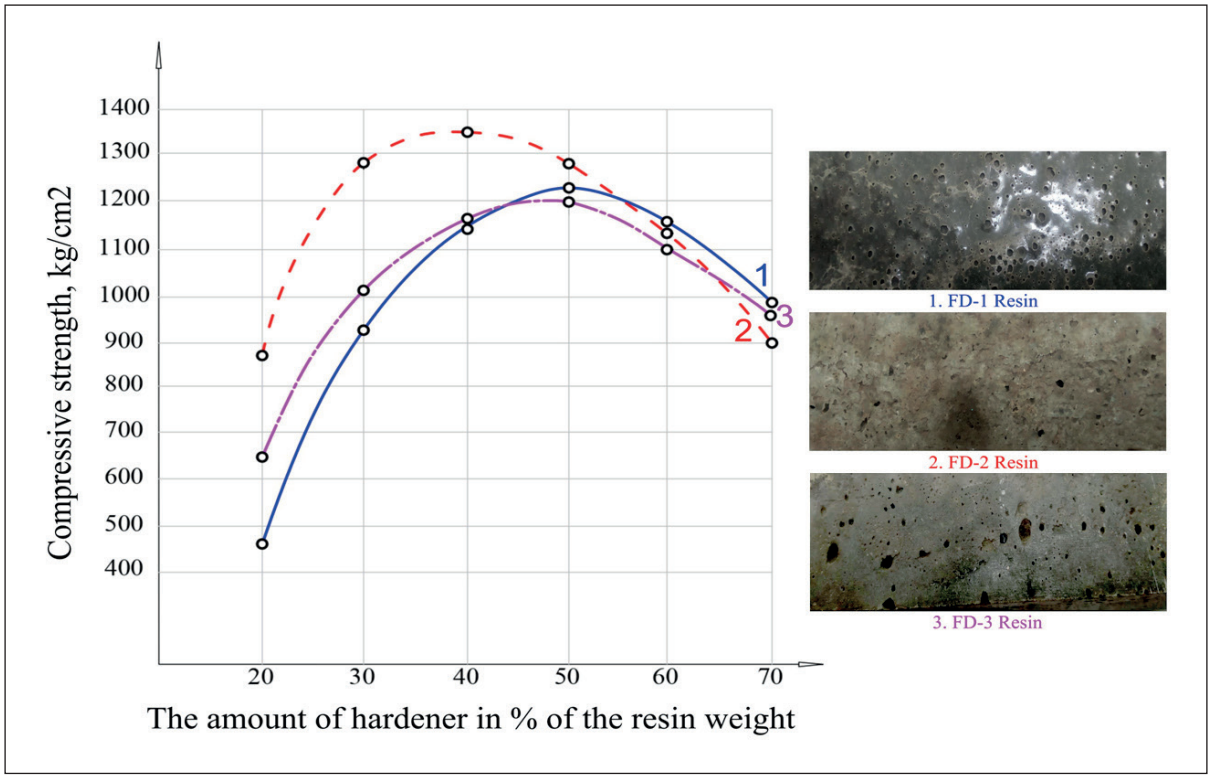

Fig. 5. **Changes in the strength of polymer concrete based on different kinds of resin depending on the amount of hardener-concentrated H_2SO_4 and BSA:** FD-1 resin; FD-2 resin; FD-3 resin

III. Aggregate – ground andesite – 1 w.p.; binder – 0.2 w.p., FD-3 resin; hardener – 0.08 w.p., combined mixture; the compression strength is 1400 kg/cm^2 (Fig. 5).

From the experiments it turned out that the most optimal ratio of furfural and diphenylamine in furfural-diphenylamine resin is 1 weight part of furfural and 0.4 weight part of diphenylamine. According to this formulation, the binder for polymer concrete was obtained. Later studies were carried out on this resin and the hardeners – BSA and combined one. Based on this principle, polymer-solution and polymer-concrete samples of various formulations were prepared, and their optimal composition and properties were determined [10, 11].

To obtain comparative data on the study of the basic properties of polymer concrete of various formulations, it is necessary to prepare and test a large number of samples of different ages [11]. Samples made of polymer concrete for strength testing should be of the following dimensions: cubes – 10×10×10 cm, 15×15×15 cm and 20×20×20 cm, beams – 10×10×40 cm, 15×15×55 cm, etc. (Fig. 6). The production and testing of such samples is labor-intensive and requires a large amount of materials, in addition, conducting appropriate tests to obtain comparative data on the resistance of polymer concrete to the destructive action of water, frost, aggressive environment on large samples will take too long [12]. Therefore, to obtain comparative data on water resistance, corrosion resistance, weather resistance and other properties, we first prepared and tested small polymer-soluble samples (3×3×3 cm cubes, 2×2×10 cm beams). The obtained data on the properties of polymer concrete based on furfural resin with additives was compared with the properties of cement concrete and polymer concrete based on furfural-acetone monomer. The latter is chosen as the most widely studied. The main raw material for obtaining the FA monomer is furfural, which is used for the production of polymer concrete, and which we are studying. The qualities that are supposed to be developed in polymer concrete used in hydraulic engineering and irrigation are strength and water resistance. Therefore, to improve these qualities, some experiments were carried out on polymer concrete produced on a base of various aggregates, kinds of resin and hardeners. Determination of polimer concrete properties on furfural-based binder was carried out according to the appropriate methods of construction material testing [13].

Polymer concrete on furfural-based binder is solidified by acid hardeners-BSA, sulfuric acid and their mixture. This fact makes it necessary to use nanostructured microfillers made of acid-resistant rocks. The ratio of the resin and aggregate amounts to get dense polymer concrete is usually selected in the same way as for cement concrete (the resin should cover the aggregate grains and fill the voids between them). The introduction of nanostructured

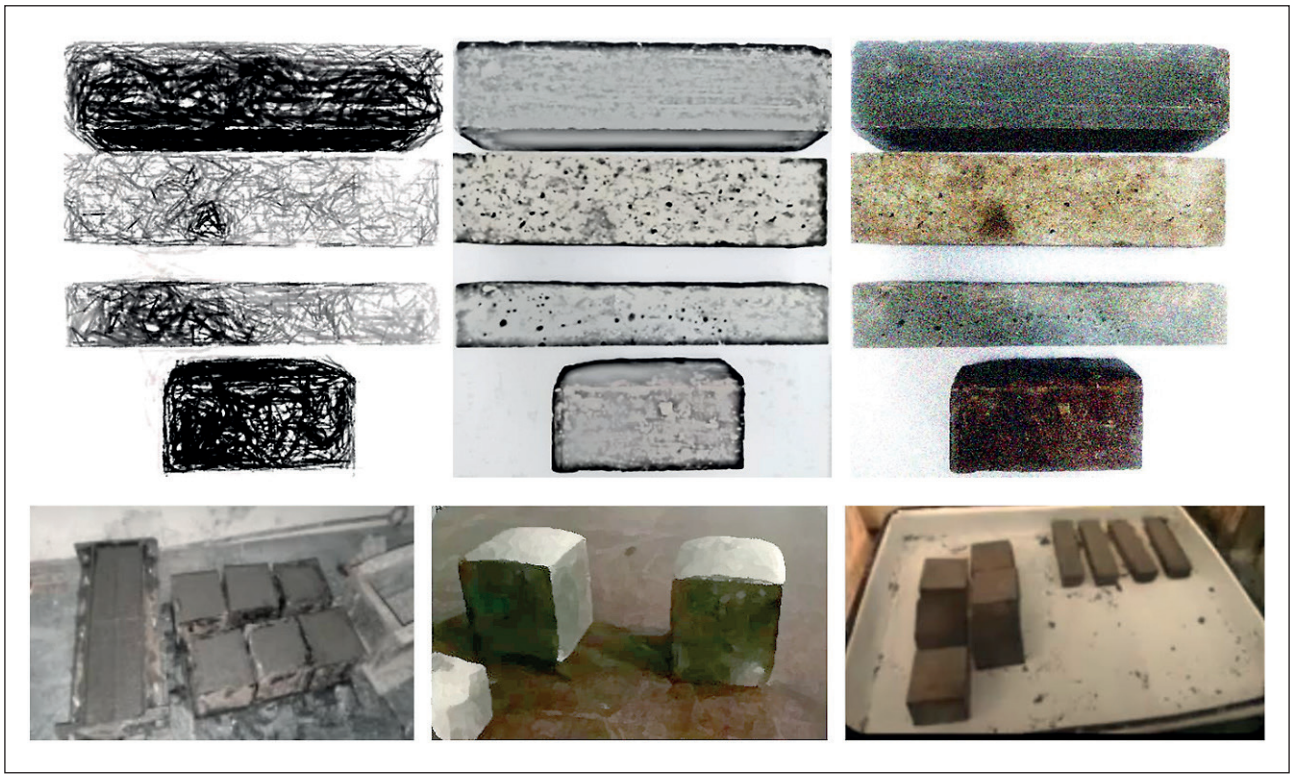

Fig. 6. **Different-sized samples of polymer concrete on furfural-based binder**

microfiller into the polymer concrete composition will save expensive resin [12–14].

Testing of various compositions of polymer solution based on nanostructured microfillers (crushed sand or ground andesite) and furfural-based binder with additives allowed us to establish the following formulations [14, 15].

1. Aggregate – microfiller – 1 w.p.; binder – 0.2 w.p., FD resin; hardener – 0.08 w.p., combined.

With the introduction of fine aggregate – sand Mk = 1.92 into polymer concrete composition, the optimal composition varies within the following limits:

2. Aggregate – fine aggregate and microfiller in the ratio of 1.5:1 by weight – 1 w.p.; binder – 0.12 w.p., FD resin; hardener – 0.05 w.p., combined.

The optimal composition of polymer concrete with coarse aggregate-gravel with a grain size of 5–20 mm can be as follows:

3. Aggregate – coarse aggregate and microfiller in the ratio of 1.5:1 by weight – 1 w.p.; binder – 0.1 w.p., FD resin; hardener – 0.04 w.p., combined.

With the introduction of all three types of aggregates (microfiller, fine aggregate, coarse aggregate) into polymer concrete composition, the optimal composition will be as follows:

4. Aggregate – nanostructured microfiller, fine and coarse aggregates in the ratio of 1:1.6:2,5 by weight – 1 w.p.; binder – 0.15 w.p., FD resin; hardener – 0.06 w.p., combined.

All these compositions will have different strength characteristics (Table 1).

The sample sizes of compositions # 1, 2 are beams – 4×4×4 cm and standard briquettes, compositions # 3, 4 are cubes – 10×10x×10 cm, beams – 10×10×32 cm and beams – 10×10×65 cm with thickened ends.

The strength of polymer concrete is determined by many factors [16–18]. The main ones include: the content of the binder and hardener amounts in polymer concrete, the hardening mode, and the mineral and petrographic characteristics of aggregates. The binder consumption is determined by the voidness of the aggregates and their fineness. The greater the voidness of the aggregate, the more binder and, accordingly, hardener will be required. The amount of hardener has a significant effect on the strength polymer concrete. With its lack, the polymerization of the binder is incomplete, which negatively affects the strength and other qualities of polymer concrete. The excess of hardener leads to rapid mixture setting, a decrease in strength, an increase in brittleness and deterioration of other indicators. The optimal content of binder and hardener should be chosen under the condition of providing such an indicator of the main characteristic of polymer concrete, which will be decisive for its operation [17, 23].

The authors studied the influence of heat treatment modes on the polymer concrete samples strength based on FD resin. We used two methods. The prepared samples

Table 1
Polymer concrete strength of different compositions

Batch composition	Yield strength, kg/cm²		
	Compressive strength	Flexural strength	Tensile strength
1	1200–1300	270–290	100–120
2	1100–1200	260–270	100–110
3	900–950	235–250	90–100
4	900–950	240–255	75–80

after their daily storage at a temperature of 18–20°C were placed in a thermo cabinet, where they were subjected to dry heating at 60, 80, and 100°C. The time of keeping the samples in the cabinet varied from 2 to 24 hours. Another series of samples was subjected to dry heating under the same conditions immediately after their manufacture. There was no difference in the results obtained by these two heating methods. The best results were shown in the treatment modes at 80°C for 10 hours and at 100°C for 8 hours. It can be concluded that heating of polymer concrete intensifies polymerization of the FD binder [17, 18, 21].

RESULTS

The first condition for high chemical resistance of polymer concretes is to achieve a complete solidification of the resin. Increased chemical resistance is provided to polymer concretes by chemically resistant aggregates, the most common of which include andesite, diabase, quartz, etc. Chemical resistance of polymer concretes is provided by graphite and related materials. To compare the stability of different samples based on FD resin in aggressive enviroment, tests were performed in the same aggressive solutions of polymer concrete samples based on FA monomer [13, 21, 23].

The tests were carried out on a series of 1×1×3 cm samples with the following composition:

a) aggregate – quartz crushed sand – 231w.p.; binder – 100 w.p., FD resin; hardener – 40 w.p., combined;

b) aggregate – graphite – 173 w.p.; binder – 100 w.p., FD resin; hardener – 40 w.p., combined;

c) aggregate – quartz crushed sand – 315 w.p.; binder – 100 w.p., FA monomer; hardener – 20 w.p., BSA; acetone – 1,6 w.p.

The chemical resistance of polymer concrete was determined by changes in the samples bending strength [16, 19, 23]. The samples were preliminarily subjected to heat treatment for 12 hours at a temperature of 80°C 2 days after manufacture. Acid solutions were used as aggressive enviroment: sulfuric acid 1% and 10%, hydrochloric acid 1% and 10%, sodium hydroxide 1% and 10%, as well as various solvents (Tables 2, 3).

Table 2
Chemical resistance of FD-based polymer solution prepared with graphite aggregate when the samples are kept in aggressive environment

Environment	Concentration, %	Variation of flexural strength after 24 hrs., kg/cm²					
		30	60	90	120	180	360
Air	–	328	334	344	340	334	345
Hydrochloric acid	1	139	167	187	170	162	154
	10	123	221	150	160	165	180
Sulphuric acid	1	130	166	160	177	178	200
	10	156	177	158	–	167	150
Sodium hyrdroxide	1	152	165	141	–	165	172
	10	160	221	193	–	208	210
Toluene	–	439	408	–	374	444	427
Benzene	–	453	411	–	393	315	409
Acetone	–	407	412	–	423	398	430
Benzine	–	419	426	–	405	400	425

Table 3
Chemical resistance of polymer solution prepared on a base of FD, FA monomer and crushed sand when the samples are kept in aggressive environment

Environment	Variation of flexural strength after 24 hrs., kg/cm²					
	Standard, kg/cm²	30	60	120	180	360
On FD resin (furfuraldiphenylamine)						
Air	306	363	410	435	428	410
Toluene	–	352	418	386	403	415
Benzene	–	383	414	439	393	390
Acetone	–	382	315	251	227	213
Benzine	–	390	370	375	320	390
On FA monomer (furfural acetone)						
Air	378	324	344	294	265	290
Toluene	–	392	393	403	385	374
Benzene	–	428	441	378	401	408
Acetone	–	108	81	65	60	54
Benzine	–	433	378	378	384	390

Reference sample strength is 356 kg/cm².

Tables 2 and 3 show that a large decrease in the small samples strength was noted in alkaline and acidic environments during bending tests, and after 30 days after immersion in an aggressive environment, the strength of samples based on ground graphite decreased by 40–50% from the initial one. The strength of the samples based on ground graphite and crushed sand in organic solvents (benzene, toluene, acetone, gasoline) increased by 20–30% from the initial one by 30–60 days of exposure.

Polymer-concrete samples based on FA monomer and crushed sand lost about 75% of their initial strength when kept in acetone, and samples based on ground graphite – about 10–15% (Table 3).

The strength of the same samples in organic solvents (toluene, benzene, gasoline) did not change in comparison with the initial one, and in some cases slightly increased. Solutions of sodium hydroxide and some acids practically do not cause a decrease in strength. It decreases after 30 days – storage in water. Further, the strength is stabilized.

The samples were tested for abrasion according to the standard procedure on the Amsler circle. Cube samples measuring 7×7×7 cm were made from 3 and 7 compositions. Aggregate – 1 w.p.; binder 0.12 w.p. – FA monomer; hardener – 0,4 w.p., BSA.

Gravel with a grain size of 5–20 mm and ground andesite in the ratio of 1.5:1 were used as aggregates (Table 4).

The method of determining the water resistance of polymer concrete is simple. Cube-samples, beams made of polymer concrete of different storage periods were placed in water and tested for compression at different storage periods. Reference samples were stored in dry conditions. The magnitude of the drop in the samples strength stored in water for different periods of time characterizes the water resistance of polymer concrete. To determine the water resistance of polymer concrete based

Table 4
Abrasion resistance of polymer concrete of various compositions at 600 m of the abrasion path (arithmetic mean data for 6 samples of each composition)

Batch composition	Weight of specimens before test, g	Weight of specimens after test, g	Abrasion area, cm²	Abrasion at 600 м/way, g/cm²	Abrasion of cement concrete M-200
7 3	754 742	746 735	49 49	0.16 0.14	0.6–1.2

on FD resin, a series of polymer concrete samples were prepared – cubes and beams based on hardeners of different types and in different quantities [19-22]. The water resistance test results of composition of 28-days age are shown in Table 5; of 60-days age – in the Table 6 and after 10 hours dry heating at a temperature of 80°C – in Table 7.

The softening coefficient K_p and water resistance $K_в$ can be easily calculated from these tables. So, for example, after 60 days period:

$$K_p = 980/1133 = 0.865;\ K_в = 1133/1180 = 0.96.$$

The best water resistance values were obtained by dry heating of the samples for 10 hours at a temperature of 80°C.

To determine the water resistance of polymer concrete with coarse aggregate, samples of composition # 3 were made (Table 8). The compositions were tested for water resistance in mineralized waters. An 8% solution of sodium sulfate was used as mineralized water (Table 9). The decrease in polymer concrete strength occurs more slowly in mineralized water than in pure water [23, 24].

The corrosion effect of polymer concrete on steel reinforcement was studied by the following method [25]. Cube-samples were made from composition # 3 measuring 10×10×10 cm: aggregate – ground andesite and gravel with a grain size of 20–40 mm in a ratio of 1:1.5 by weight – 1w.p.; binder – 0.1 w.p., FD resin; hardener – 0.04 w.p., combined.

Table 5
Change in polymer concrete water resistance at 28 days-age, depending on the time spent in water

Type of hardener, amount out of the binder weight, %	Compressive strength yield of specimens before immersing in water, kg/cm²	Compressive strength yield of specimens stored in water for 24 hrs., kg/cm²									
		30	60	90	120	150	180	270	360	540	720
Sulphuric acid, 30	1180	1060 1155	980 1133	910 1000	880 920	855 920	825 900	810 905	820 905	815 895	820 900
Benzenesulfonic acid, 50	1120	1060 1155	965 1065	912 1022	872 990	844 950	820 920	808 898	794 895	805 900	800 910
Combined, 40	1260	1205 1115	1155 1045	1105 1000	1065 935	1045 200	1025 872	1015 859	1020 865	1010 854	1010 860

Table 6
Change in polymer concrete water resistance at 60 days-age, depending on the time spent in water

Type of hardener, amount out of the binder weight, %	Compressive strength yield of specimens before immersing in water, kg/cm²	Compressive strength yield of specimens stored in water for 24 hrs., kg/cm²			
		60	120	180	240
Sulphuric acid, 30	1220	1105	930	900	905
Benzenesulfonic acid, 50	1205	1160	1160	1109	1100
Combined, 40	1295	1200	1150	1092	1096

Table 7
Change in polymer concrete water resistance after its dry heating at 80°C for 10 hours, depending on the time spent in water

Type of hardener, amount out of the binder weight, %	Compressive strength yield before immersing in water kg/cm²	Compressive strength yield of specimens stored in water for 24 hrs., kg/cm²				
		60	120	150	180	240
Benzenesulfonic acid, 50	1200	1160	1135	1122	1115	1108
Combined, 40	1255	1185	1150	1137	1120	1125

Table 8
Change in the strength of polymer concrete based on FD resin during storage in water

Batch composition	Compressive strength yield of specimens, kg/cm²						
	before immersing in water	after storing in water for 24 hrs.:					
		30	60	90	120	240	360
3	750	620	650	610	590	550	530

Table 9
Change in the strength of polymer concrete based on FD resin during storage in mineralized water

Batch composition	Compressive strength yield of specimens, kg/cm²						
	before immersing in mineral water	after storing in water for 24 hrs:					
		30	60	90	120	240	360
3	780	715	680	650	670	640	620

During the manufacturing process, polished steel rods 16 mm in diameter and 80 mm long were embedded in each sample. Before concreting, the rods were cleaned with acetone and weighed. The samples were stored indoors at an air temperature of 18–20°C. After 12 months-storage, some of the samples were crushed, the rods were removed and carefully weighed again. The remaining samples were tested at 18 and 24 months-ages. It was found that the weight of the rods did not change over time. No traces of corrosion were found on the surface of the rods. Consequently, the environment of polymer concrete based on FD resin does not have a corrosive effect on steel reinforcement [25].

The numerator shows the test results of samples in a wet state, and the denominator shows the test results of samples dried to a constant weight.

The metal reinforcement adhesion tests were carried out by extracting steel rods of smooth profile at d = 16 mm of A–1 grade from 10x10x20 cm prisms manufactured from The embedment depth of the rods was 20 cm. The rods were kept 28 and 60 days after the samples manufacture. The test data showed that the adhesion of the reinforcement to polymer concrete is 108 kg/cm² [25].

The polymer concrete compressive elastic modulus was defined on prisms measuring 7×7×22 cm by strainmeters reinforced on both sides with a base of 20 mm, with a division value of 1 mm, and dial gauge with a division value of 0.01 mm. The load was carried out in steps equal to prismatic 0.1 R. Each step was followed by a 5-minute exposure time. Due to the elastic aftereffect, the strain readings were made at each step twice: at the time the load was applied to measure elastic deformations and after the exposure to measure plastic, permanent deformation.

During tension tests, the elastic modulus was determined in a similar way on prism samples measuring 10×10×60 cm, with thickened ends. The mean arithmetic test data of 5 samples were as follows: Prismatic strength – 850 kg/cm², tensile strength – 90 kg/cm²; compressive elastic modulus – 298 000 kg/cm², and in tension –160 000 kg/cm².

DISCUSSION

The test results show that polymer concrete based on FD resin is little different from polymer concrete based on FA monomer. The strength indicators of the first one are 20–25% higher, and other properties don't differ much.

The cost of polymer concrete based on FD resin is 10–15% lower than the cost of polymer concrete based on FA resin. An important advantage of FD resin over FA is that its production does not require technological equipment and labor.

To determine the optimal resin compositions, experiments were conducted similar to those with diphenylamine, and it was determined that the optimal ratio of furfural and diphenylamine production waste is 1:0,75-1, and the amount of hardener (combined) is 40% of the resin weight, which we conventionally call FOD resin (Table 10).

In the study of the properties of polymer concrete based on FOD resin, it was found that it had good water resistance. Samples of the following compositions were made for testing:

8. Aggregate – ground andesite – 1w.p.; binder – 0.25 w.p., FOD resin; hardener – 0.1 w.p., combined.

9. Aggregate – gravel, sand, crushed sand in a weight ratio of 2.5:1.6:1 – 1w.p.,; binder – 0.15 w.p., FOD resin; hardener – 0.06 w.p., combined.

Gravel with a grain size of 5–20 mm and sand Mk = 1.84 were used as aggregates. Composition # 8 was used

Table 10
Basic properties of polymer concrete and polymer solutions

Physical and technical indicators	Unit of measurement	On FA monomer		On FD resin		On FOD resin	
		solvent	concrete	solvent	concrete	solvent	concrete
Volume weight	g/cm³	2.0–2.1	2.1–2.15	2.0–2.1	2.05–2.2	2.0–2.1	2.1–2.15
Compressive strength yield	kg/cm²	800–1000	600–700	1100–1300	700–750	900–1000	650–750
Tensile strength yield	kg/cm²	80–90	60–70	90–100	80–90	85–90	65–75
Flexural strength yield	kg/cm²	180–200	120–160	200–210	180–190	190–195	150–170
Specific impact strength	kg/cm²	1.8–2.0	2–3	1.8–2.0	2.5–3	1.8–2.0	2.2–3
Linear shrinkage	mm/linear meter	4.0–4.5	–	3.2–3.6	–	4.0–4.5	–
Volume shrinkage	%	4.5–5	–	3.5–3.8	–	4.2–4.5	–
Elastic modulus	kg/cm²	–	200000–250000	–	270000–290000	–	210000–240000
Abrasion	g/cm²	–	0.350	–	0.214	–	0.008
Water absorption in 24 hours	% by weight	–	0.010	–	0.012	–	0.008
Waterproof	atm/day	–	18/90	–	18/90	–	18/90

Table 11
Change in the strength of polymer concrete based on FOD resin during storage in water

Batch composition	Compressive strength yield of specimens, kg/cm²						
	before immersing in water	after storing in water for 24 hrs.					
		30	60	90	120	180	360
8	930	870	840	810	790	765	750
9	550	510	490	475	470	450	460

to manufacture 3×3×3 cm cubes and composition # 9 for cubes measuring 7×7×7 cm. After storing at room temperature for 60 days, the samples were placed in water. The standards were stored in a dry environment (Table 11).

Microstructure studies of polymer-concrete samples based on FA monomer, FD and FOD resin were performed on a JEOL JSM7500 scanning electron microscope with X-ray spectral analysis attachment (Fig. 7). The results obtained correlate with the above experimental data. A shot study showed that all three samples have a similar structure. There are no significant differences in the structures. The proposed new samples of polymer concretes based on FD and FOD resin have improved characteristics and are equal to polymer concrete based on FA monomer in terms of strength, chemical resistance, lasting properties, water resistance, abrasion resistance and adhesion to metal.

CONCLUSION

Based on the results of the study, the following conclusions can be drawn:

1. In the proposed method to manufacture polymer concrete, it is suggested to use an ordinary solution of one chemical product in another as a binder. In this case, the cost of performing technological operations to obtain a binder is not required, and its cost will be almost the same as the cost of the initial products.

2. From a comparison of technologies for obtaining FD resin and manufacturing polymer concrete, as well as from preliminary test data of the studied materials, it is possible to determine the possible technical and economic advantages of polymer concrete based on FD resin over polymer concrete based on FA monomer which is currently used in construction of hydro-engineering structures.

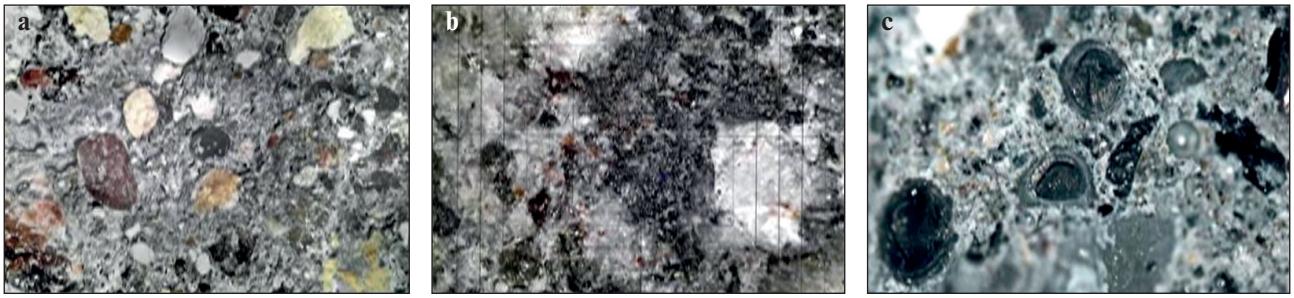

Fig. 7. **Microstructure of polymer concrete samples:** a – based on FA monomer; b – based on FD resin; c – based on FOD resin

3. Polymer concrete based on FD resin has high strength and exceeds the strength of polymer concrete based on FA monomer by 20–25%.

4. A great advantage of polymer concrete based on the binder – mixture of furfural with diphenylamine production waste, in comparison with other types of polymer concrete can be its low cost. The low cost of polymer concrete is due to the low cost of the binder consisting of 1 weight part of furfural and 0.75 weight part of chemical production waste, which is dumped.

5. The technology of manufacturing polymer concrete based on the binder – mixture of furfural and diphenylamine, diphenylamine production waste is similar to the technology of manufacturing polymer concrete based on FA monomer.

REFERENCES

1. Jakiyayev BD, Moldamuratov ZN, Bayaliyeva GM, Ussenbayev BU, Yeskermessov ZE. Study of local erosion and development of effective structures of transverse bank protection structures. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2021; 9(3): 457–473. Available from: https://doi.org/10.21533/pen.v9i3.2191

2. Kryžanowski A, Mikoš M, Šušteršic J, Planinc, I. Abrasion resistance of concrete in hydraulic structures. *ACI Materials Journal*. 2009; 106(4): 349–356. Available from: https://doi.org/10.14359/56655

3. Balzannikov MI, Mikhasek AA. The use of modified composite materials in building hydraulic engineering structures. *In Procedia Engineering*. 2014; 91: 183–187. Elsevier Ltd. Available from: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.043

4. Mazgaleva A, Bobylskaya V, Reshetnikov M. Concrete Polymer Material for the Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures of Hydraulic Structures from Biological Damage. *In Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 402 LNNS: 1148–1158. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_126

5. Moldamuratov ZhN, Iglikov AA, Sennikov MN, Madaliyeva EB, Turalina MT. Irrigation channel lining using shotcrete with additives. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(3): 227–240. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-227-240. – EDN: BIEVUB.

6. Elshin IM. Polymer concretes in construction of hydraulic structures. *Hydrotechnical Construction*. 1981; 15(5): 269–272. Available from: Available from: https://doi.org/10.1007/BF01426730

7. Susilorini RM, Iskandar IR, Santosa BI. Long-Term Durability of Bio-Polymer Modified Concrete in Tidal Flooding Prone Area: A Challenge of Sustainable Concrete Materials. *Sustainability (Switzerland)*. 2022; 14(3): 1565. Available from: https://doi.org/10.3390/su14031565

8. Onyshchenko A, Garkusha M, Klymenko M. Analysis of design and construction of hydrotechnical structures of transport construction in the from of water pipes made of polimer matters. *Dorogi i Mosti*. 2021; 24: 112–133. Available from: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112

9. Galvão JCA, Portella KF, Joukoski A, Mendes R, Ferreira ES. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(2): 1049–1055. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073

10. Sennikov MN, Omarova GE, Moldamuratov ZN. Study of the development of soil in the formation of channels hydraulic and static stability of cross-sectional shapes. *World Applied Sciences Journal*. 2014; 30(1): 99–104. Available from: https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.01.14008

11. Mazitova AK, Aminova GK, Buylova EA, Zaripov II, Vikhareva IN. Biodegradable polymer materialsand modifying additives: state of the art. Part III. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(2): 73–78. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-73-78

12. Abdrakhmanova LA, Galeev RR, Khantimirov AG, Khozin VG. Efficiency of carbon nanostructures in the composition of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(3): 150–157. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157

13. Morozova MV, Ayzenshtadt AM, Akulova MV, Frolova MA, Shamanina AV. Evaluation of the possibility to use powders of polymineral silica-containing sands as a hydrophobizing coating. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(4): 222–228. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-222-228

14. Baldanov AB, Bokhoeva LA, Shalbuev DV, Tumurova TB. Collagen Based Bio-Additives in Polymer Composites. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(2): 137–144. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-137-144

15. Grzesiak S, Pahn M, Klingler A, Akpan EI, Schultz-Cornelius M, Wetzel B. Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Lamellas for Renovation of Concrete Structures. *Polymers*. 2022; 14(4): 790. Available from: https://doi.org/10.3390/polym14040790

16. Kujawa W, Tarach I, Olewnik-Kruszkowska E, Rudawska A. Effect of polymer additives on the microstructure and mechanical properties of self-leveling rubberised concrete. *Materials*. 2022; 15(1): 249. Available from: https://doi.org/10.3390/ma15010249

17. Bondarev BA, Pankov AE, Belyaev TK. The influence of structure forming factors on low-cycle fatigue of a polymer composite material based on furfural acetone monomer (FAM). *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019; 10(2): 119–125. Available from: https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.1.10

18. Gutarowska B, Kotynia R, Bieliński D, Anyszka R, Wreczycki J, Piotrowska M, Dziugan P. New sulfur organic polymer-concrete composites containing waste materials: Mechanical characteristics and resistance to biocorrosion. *Materials*. 2019; 12(16): 2602. Available from: https://doi.org/10.3390/ma12162602

19. Korneev AD, Meleshkin MF, Borkov PV. The durability of composite materials based on furfurolacetone monomer. *Construction Materials*. 2013; 15: 64–65.

20. Kumar A, Arora HC, Kapoor NR, Mohammed MA, Kumar K, Majumdar A, Thinnukool O. Compressive Strength Prediction of Lightweight Concrete: Machine Learning Models. *Sustainability (Switzerland)*. 2022. 14(4): 2404. Available from: https://doi.org/10.3390/su14042404

21. Flohr A, Osburg A. Design and Development of Concretes for Special Rehabilitation Tasks. *In MATEC Web of Conferences*. 2018; 199: 07001. EDP Sciences. Available from: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819907001

22. Jin-Min G, Yi W, Yi-Shun Z. Experimental research on modified polymer concrete. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014; 19: 4167–4176.

23. Gunasekaran M. Polymer-Impregnated Concrete Insulators/Insulating Structures. *In 2019 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC*. 2019; 193–196. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Available from: https://doi.org/10.1109/EIC43217.2019.9046588

24. Tchetgnia-Ngassam IL, Lespinasse F, Marceau S, Chaussadent T. Physico-chemical properties and durability of polymer modified repair materials. *In Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*. 2012. 916–921. Available from: https://doi.org/10.1201/b12750-152

25. Manapbayev B, Alimbayev B, Amanbayev E, Kabdushev A., Moldamuratov Zh. Study of internal corrosion on the turning angles in steel pipes. *E3S Web of Conferences*. 2021; 225:01004. Available from: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122501004

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhangazy N. Moldamuratov – PhD, Associate Professor, Director of the Science Center, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, zhanga_m_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4573-1179

Raikhan S. Imambayeva – Cand. Sci. (Eng.), Academic Professor, Dean of the Faculty of General Construction, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan, rimambayeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0806-3308

Nurlan S. Imambaev – Master Sci. (Eng.), Senior lecturer of the Department «Construction and Design», Manash Kozybayev North Kazakhstan university, Petropavlovsk, Kazakhstan, imambaevn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-8878

Altaiy A. Iglikov – Master Sci. (Eng.), Senior lecturer of the Department «Construction and Production of Materials», M.Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz, Kazakhstan, altaiy_1976@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0134-6989

Sagyntai Zh. Tattibayev – PhD doctoral student of the educational program «Hydraulic engineering and structures», M.Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz, Kazakhstan, tsagin75@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2687-0189

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Moldamuratov Zh.N. – scientific leadership; research concept; methodology development; final results.

Imambayeva R.S. – writing an article, scientific editing of the text.

Imambaev N.S. – experimental work carrying out; experimental data processing; material accumulation.

Iglikov A.A. – preparation of prototypes, writing an article, scientific editing of the text.

Tattibayev S.Zh. – experimental work carrying out; experimental data processing; material accumulation.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 06.08.2022; approved after reviewing 23.08.2022; accepted for publication 25.08.2022.

Научная статья
УДК 637.1
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318

CC BY 4.0

Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования в гидротехническом строительстве

Жангазы Нуржанович Молдамуратов[1, 4*], Райхан Сальтайевна Имамбаева[1], Нурлан Сальтаевич Имамбаев[2], Алтайы Аманкулович Игликов[3], Сагынтай Жакыпалиевич Таттибаев[3]

[1] Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан
[2] Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан
[3] Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан
[4] Экспертиза сейсмостойкого строительства, Тараз, Казахстан

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

АННОТАЦИЯ: Введение. Исследования свойств полимербетона показали, что он выгодно отличается от обычного бетона такими показателями, как механическая прочность, стойкость к агрессивным воздействиям различных сред, водостойкость, истираемость, водонепроницаемость, морозостойкость. В настоящее время можно получить полимербетоны с характерными и химическими свойствами: заданной плотностью, прочностью, деформативностью, пластичностью, коррозиостойкостью. **Методы и материалы.** Исследования проводились методом сравнения лабораторных испытаний полимербетона на фурфурольном связующем. Фурфурол обладает большой реакционной способностью и может образовывать смолообразные соединения со многими химическими продуктами. В фурфурол в разных соотношениях добавлялся дифениламин. В качестве отвердителя использовались бензолсульфокислота, серная кислота и их смесь при соотношении 1:1 по весу. Заполнителем различных составов полимеррастворов служил молотый песок или молотый андезит на наноструктурированном микронаполнителе. Испытания проводились на прочность, химическую стойкость, износостойкость, водостойкость, истираемость, адгезию с металлом. Структурные изменения свойств изучались методом электронно-микроскопического анализа. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что раствор дифениламина в фурфуроле, при условии отверждения его серной кислотой, бензолсульфокислотой или смесью этих кислот, является полимерным связующим, способным при твердении в обычных условиях с кислотостойкими заполнителями образовывать материал высокой прочности. Определено, что при приготовлении смолы соотношение фурфурола и дифениламина должно быть в пределах 1:0,5–0,3 по весу. Смола, содержащая 1 весовую часть фурфурола и 0,5 весовую часть дифениламина, условно названа ФД-1; содержащая 1 весовую часть фурфурола и 0,4 весовую часть дифениламина – ФД-2, смола же с 0,3 весовой частью дифениламина – ФД-3. **Заключение и выводы.** Введение в состав полимербетона наноструктурированного микронаполнителя позволит сэкономить дорогостоящую смолу. Сравнением технологий получения смолы ФД и изготовления полимербетона, а также из предварительных данных испытаний изучаемых материалов можно определить возможные технико-экономические преимущества полимербетона на смоле ФД перед применяемым в настоящее время в строительстве гидротехнических сооружений полимербетоном на мономере ФА (фурфуролацетоновый). Полимербетон на смоле ФД обладает высокой прочностью и превышает прочность полимербетона на мономере ФА на 20–25%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимербетон, фурфурол, дифениламин, смола, наноструктурированные микронаполнители, полимеррастворы, гидротехнические сооружения.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках научного проекта № AP13268964.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Молдамуратов Ж.Н., Имамбаева Р.С., Имамбаев Н.С., Игликов А.А., Таттибаев С.Ж. Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования в гидротехническом строительстве // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 306–318. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318. – EDN: JOZNEX.

© Молдамуратов Ж.Н., Имамбаева Р.С., Имамбаев Н.С., Игликов А.А., Таттибаев С.Ж., 2022

ВВЕДЕНИЕ

В гидротехническом строительстве полимербетон может быть применен при возведении отдельных частей (водоскаты, гасители и др.) сооружений, подвергающихся интенсивному разрушению. Этот материал уложен на ряде гидротехнических сооружений Средней Азии и Казахстана [1].

Обследование Караспанского гидроузла в Туркестанской области Республики Казахстан, на котором водоскат выполнен из полимербетона объемом 575 м^3, показало, что после многолетней эксплуатации сооружения водоскат не разрушился (рис. 1).

Основная причина, которая задерживает широкое применение полимербетонов в строительстве гидротехнических сооружений, – это его высокая стоимость, отсутствие приемлемой технологии изготовления, недостаточная изученность его свойств, которые в значительной степени отличаются от свойств обычного бетона [2, 3]. Основное удорожание падает на стоимость синтетического вяжущего, самым распространенным и дешевым из которых является смола – фурфуролацетоновый мономер ФА. Стоимость 1м^3 полимербетона, изготовленного на мономере ФА, в 2,5–3 раза дороже железобетона и в 4–5 раз – обычного цементного бетона. Высокая стоимость полимерного связующего обусловливается не только высокой стоимостью химических продуктов, из которых его получают, но и большими затратами на осуществление технологических операций по изготовлению [4, 5].

Исследования, проводимые по изысканию фурфурольных смол, дают возможность разработать нетрудоемкую технологию получения связующих для полимербетонов. Фурфурол обладает большой реакционной способностью и может образовывать смолообразные соединения со многими химическими продуктами при довольно простых условиях (обычном давлении и низких температурах). Примером тому может служить получение фурфуроланилиновой смолы, а также образование других смолообразных продуктов при взаимодействии фурфурола с ароматическими аминами и их производными. Однако задача получения экономичного полимерного связующего будет решена только в том случае, если получаемый при простых условиях изготовления смолообразный продукт сможет обеспечить требуемые качества строительных изделий (достаточную прочность, долговечность) [2–5].

Рис. 1. **Водоскат Караспанского гидроузла**

В лаборатории строительных материалов авторами получено полимерное связующее на основе фурфурола и ароматического амина – дифениламина. Установлено, что раствор дифениламина в фурфуроле, при условии отверждения его серной кислотой, бензолсульфокислотой или смесью этих кислот, является полимерным связующим, способным при твердении в обычных условиях с кислотостойкими заполнителями образовывать материал высокой прочности. Это полимерное связующее названо смолой ФД. В данном случае затраты на изготовление будут состоять из стоимости исходных продуктов [4–6].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Оптимальный состав связующего определялся следующим образом. В фурфурол в разных соотношениях добавлялся дифениламин. Смесь перемешивалась. Продукт в фурфуроле растворялся при обычных условия, и образовывалось смолообразное вещество. На этом связующем изготавливали полимербетонные образцы – кубы размером 3×3×3 см, при этом использовались три вида отвердителя: бензолсульфокислота, серная кислота и их смесь при соотношении 1:1 по весу. Заполнителем служил молотый андезит. После хранения в течение определенных сроков при комнатной температуре или в сушильном шкафу затвердевшие образцы испытывались на прочность [7].

Опытами установлено, что при приготовлении смолы соотношение фурфурола и дифениламина должно быть в пределах 1:0,5–0,3 по весу. Смола, содержащая 1 весовую часть (в.ч.) фурфурола и 0,5 весовую часть дифениламина, условно названа ФД-1; содержащая 1 весовую часть фурфурола и 0,4 весовую часть дифениламина – ФД-2, смола же с 0,3 весовой частью дифениламина – ФД-3. Из этих смол готовились полимеррастворные образцы – кубы размером 3×3×3 см. Каждая полимеррастворная смесь содержала 20% смолы ФД. Отверждались эти смеси различным количеством серной кислоты, бензолсульфокислоты (БСК) и комбинированным отвердителем [7–9].

Затвердевшие образцы, отформованные из полимеррастворных смесей, после хранения в течение 28 суток при комнатной температуре испытывались

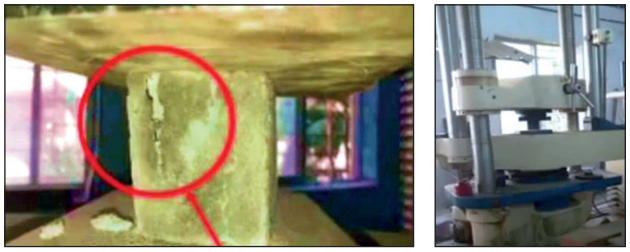

Рис. 2. **Испытание образцов на сжатие**

на сжатие (рис. 2). Результаты испытания позволили установить наиболее оптимальные составы полимербетонов. Данные испытаний образцов приведены на рис. 3, 4, 5.

Максимальная прочность полимеррастворов, отверждаемых различными отвердителями, получена при следующих рецептурах:

I. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД-1; отвердитель – 0,06 в.ч., серная кислота; предел прочности при сжатии – 1270 кг/см^2 (рис. 3).

II. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД-2; отвердитель – 0,1 в.ч., БСК; предел прочности при сжатии – 1220 кг/см^2 (рис. 4).

III. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД-3; отвердитель – 0,08 в.ч., комбинированный; предел прочности при сжатии – 1400 кг/см^2 (рис. 5).

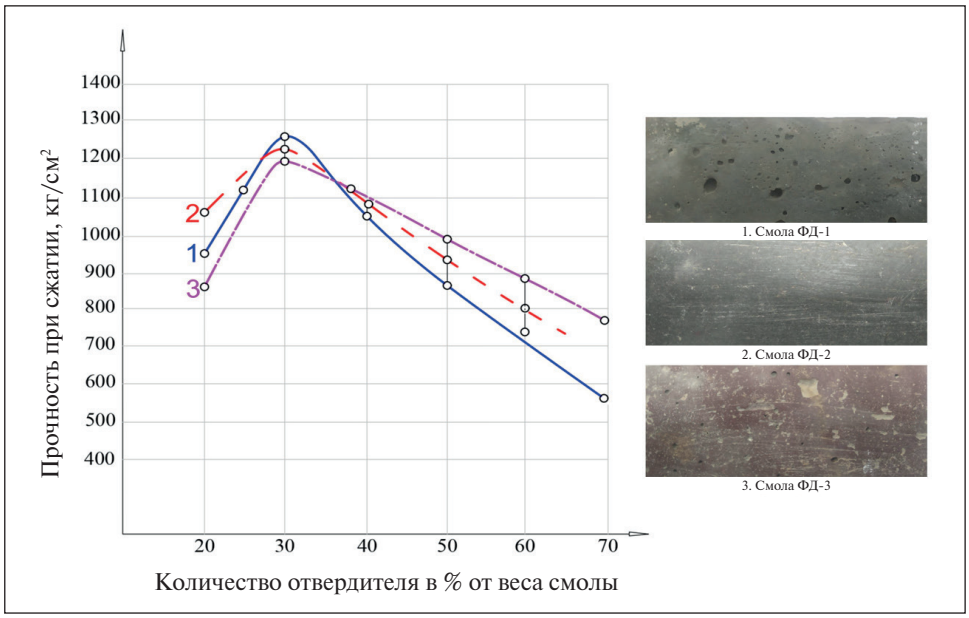

Рис. 3. **Изменение прочности полимербетона на различных смолах в зависимости от количества отвердителя – концентрированной H_2SO_4:** смола ФД-1; смола ФД-2; смола ФД-3

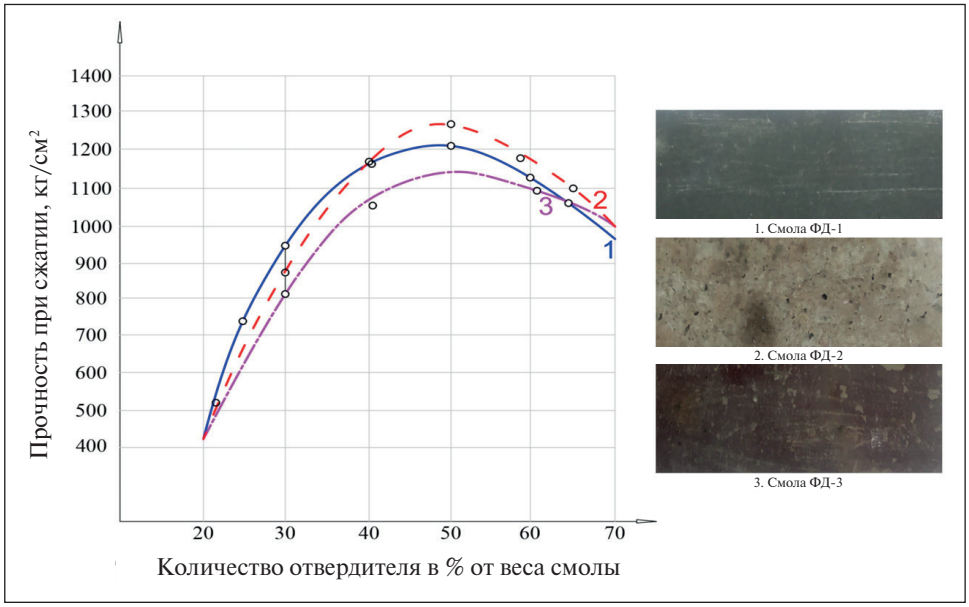

Рис. 4. **Изменение прочности полимербетона на различных смолах в зависимости от количества отвердителя – бензолсульфокислоты:** смола ФД-1; смола ФД-2; смола ФД-3

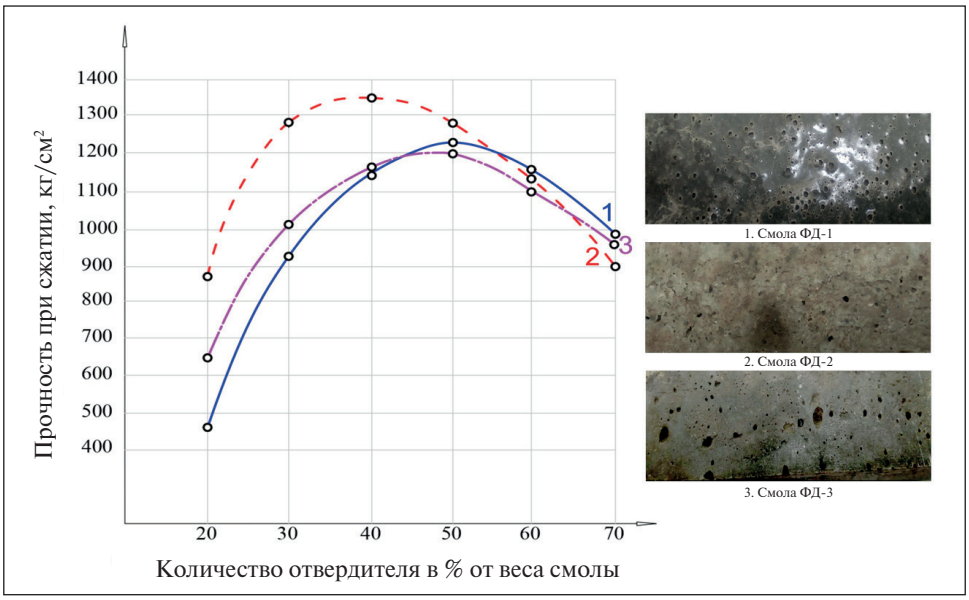

Рис. 5. **Изменение прочности полимербетона на различных смолах в зависимости от количества отвердителя – концентрированной H_2SO_4 и БСК:** смола ФД-1; смола ФД-2; смола ФД-3

Из опытов выяснилось, что наиболее оптимальное соотношение фурфурола и дифениламина в фурфуролдифениламиновой смоле – 1 весовая часть фурфурола и 0,4 весовая часть дифениламина. По этой рецептуре было получено связующее для полимербетонов. Последующие исследования были проведены на этой смоле и на отвердителях – БСК и комбинированном. На основании этого принципа готовились полимеррастворные и полимербетонные образцы различных рецептур, определялся их оптимальный состав и свойства [10, 11].

Для получения сравнительных данных по исследованию основных свойств полимербетона различных рецептур необходимо готовить и испытывать большое число образцов различного возраста [11]. Образцы из полимербетонов для испытания на прочность должны быть следующих размеров: кубы 10×10×10 см, 15×15×15 см и 20×20×20 см, балки 10×10×40 см, 15×15×55 см и т.д. (рис. 6). Изготовление и испытание таких образцов трудоемко и требует большого количества материалов, кроме того, проведение соответствующих испытаний для получения сравнительных данных о стойкости полимербетона к разрушающему действию воды, мороза, агрессивной среды на образцах крупного размера займет слишком много времени [12]. Поэтому для получения сравнительных данных о водостойкости, коррозийности, атмосферостойкости и других свойствах вначале готовились и испытывались на полимеррастворных образцах малого размера (кубики размером 3×3×3 см, балочки 2×2×10 см). Полученные данные при определении свойств полимербетона на фурфурольной смоле с добавками сравнивались со свойствами цементного бетона и полимербетона на фурфурольно-ацетоновом мономере. Последний выбран как наиболее широко изученный. Основным сырьем для получения мономера ФА является фурфурол, который используется для изготовления полимербетона, изучаемого нами. Качества, которые предполагается выработать в полимербетонах, применяемых в гидротехнике и ирригации, – это прочность и водостойкость. Поэтому на полимербетонах, изготовляемых на различных заполнителях, смолах и отвердителях, проводились опыты по улучшению этих качеств. Определение свойств на фурфурольном связующем проводилось по соответствующим методикам испытания строительных материалов [13].

Полимербетон на фурфурольном связующем отверждается кислотными отвердителями: БСК, серной кислотой и их смесью, что делает необходимым применение наноструктурированных микронаполнителей из кислотостойких пород. Соотношение количества смолы и заполнителя для плотного полимербетона обычно подбирают так же, как для цементного бетона (смола должна покрыть зерна заполнителя и заполнить пустоты между ними). Введение в состав полимербетона наноструктурированного микронаполнителя может сэкономить дорогостоящую смолу [12–14].

Испытание различных составов полимеррастворов на наноструктурированном микронаполнителе (молотый песок или молотый андезит) и фурфурольном связующем с добавками позволило установить следующие рецепты [14, 15]:

1. Заполнитель – 1 в.ч., микрозаполнитель; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,08 в.ч., комбинированный.

При введении в состав полимербетона мелкого заполнителя – песка Мк = 1,92 – оптимальный состав колеблется в следующих пределах:

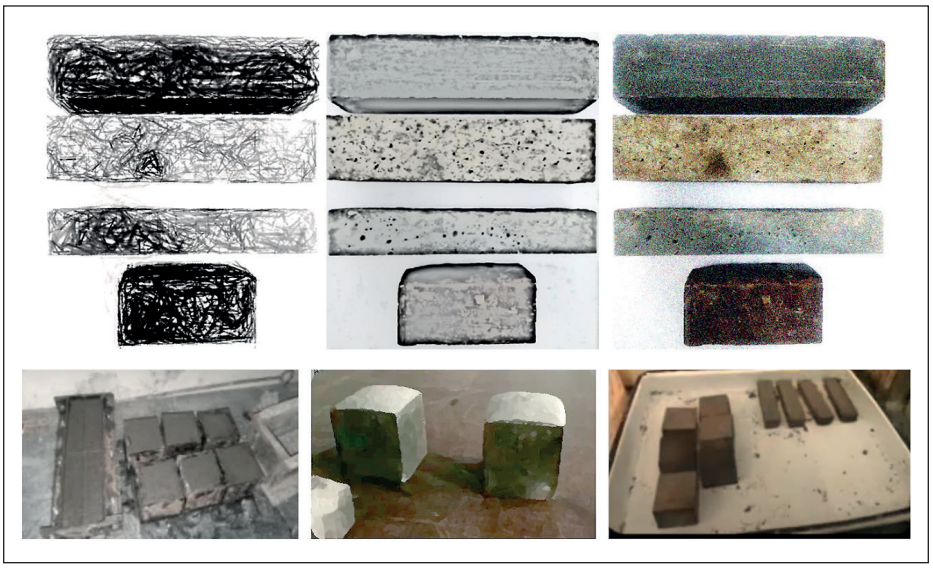

Рис. 6. **Образцы полимербетона на фурфурольном связующем разных размеров**

2. Заполнитель – 1 в.ч., мелкий и микрозаполнитель в соотношениях 1,5:1 по весу; вяжущее – 0,12 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,05 в.ч., комбинированный.

Оптимальный состав полимербетона с крупным заполнителем – гравием крупностью 5–20 мм – может быть следующим:

3. Заполнитель – 1 в.ч., крупный и микрозаполнитель в соотношениях 1,5:1 по весу; вяжущее – 0,1 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,04 в.ч., комбинированный.

При введении в состав полимербетона всех трех видов заполнителей (микрозаполнителя, мелкого, крупного) оптимальный состав будет следующим:

4. Заполнитель – 1 в.ч., наноструктурированный микрозаполнитель, мелкий и крупный в соотношениях по весу 1:1,6:2,5; вяжущее – 0,15 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,06 в.ч., комбинированный.

Все эти составы будут иметь различные прочностные характеристики (табл. 1).

Размер образцов состава 1, 2 – балочки 4×4×4 см и стандартные восьмерки, составы 3, 4 – кубы 10×10×10 см, балочки 10×10×32 см и балочки 10×10×65 см с утолщенными концами.

Прочность полимербетона определяется многими факторами [16–18]. К числу основных из них относятся: содержание в полимербетоне количества вяжущего, отвердителя, режим твердения, минерально-петрографическая характеристика заполнителей. Расход вяжущего определяется пустотностью заполнителей и их крупностью. Чем больше пустотность заполнителя, тем больше потребуется вяжущего и, соответственно, отвердителя. Количество отвердителя оказывает существенное влияние на прочность полимербетона. При его недостатке полимеризация вяжущего идет неполно, что отрицательно сказывается на прочности и других качествах полимербетона. Избыток отвердителя приводит к быстрому схватыванию смеси, уменьшению прочности, к увеличению хрупкости и ухудшению других показателей. Оптимальное содержание вяжущего и отвердителя необходимо выбирать из условия обеспечения такого показателя основной характеристики полимербетона, который будет решающим для его эксплуатации [17, 23].

Таблица 1

Прочность полимербетона разных составов

№ составов	Предел прочности, кг/см^2		
	при сжатии	на растяжение при изгибе	при растяжении
1	1200–1300	270–290	100–120
2	1100–1200	260–270	100–110
3	900–950	235–250	90–100
4	900–950	240–255	75–80

Авторами изучалось влияние режимов термообработки на прочность образцов полимербетона на смоле ФД. Применили два способа. Изготовленные образцы после суточного их хранения при температуре 18–20°С помещались в термошкаф, где подвергались сухому подогреву при 60, 80, 100°С. Время выдерживания образцов в шкафу изменялось от 2 до 24 часов. Другая серия образцов сразу после их изготовления подвергалась сухому подогреву при таких же режимах. Разницы в результатах, полученных этими двумя способами подогрева, не наблюдалось. Лучшие результаты показали режимы обработки при 80°С в течение 10 часов и при 100°С в течение 8 часов. Можно сделать вывод, что нагрев полимербетона интенсифицирует полимеризацию связующего ФД [17, 18, 21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первым условием высокой химической стойкости полимербетонов является достижение полноты отверждения смолы. Повышенную химическую стойкость сообщают полимербетонам химически стойкие заполнители, к самым распространенным из которых относят андезит, диабаз, кварц и др. Химическую стойкость полимербетонам сообщает графит и родственные ему материалы. Для сравнения стойкости различных образцов на смоле ФД в агрессивных средах проводились испытания в тех же агрессивных растворах образцов полимербетона на мономере ФА [13, 21, 23].

Испытания были проведены на серии образцов размером 1×1×3 см следующего состава:

а) заполнитель – 231 в.ч., кварцевый молотый песок; вяжущее – 100 в.ч., смола ФД; отвердитель – 40 в.ч., комбинированный;

б) заполнитель – 173 в.ч., графит; вяжущее – 100 в.ч., смола ФД; отвердитель – 40 в.ч., комбинированный;

в) заполнитель – 315 в.ч., кварцевый молотый песок; вяжущее – 100 в.ч., мономер ФА; отвердитель – 20 в.ч., БСК; ацетон – 1,6 в.ч.

Химическая стойкость полимербетонов определялась по изменению прочности образцов при изгибе [16, 19, 23]. Образцы предварительно подвергались термообработке в течение 12 часов при температуре 80°С через 2 суток после изготовления. В качестве агрессивных сред были использованы растворы кислот: серной 1% и 10%, соляной 1% и 10%, едкого натра 1% и 10%, а также различные растворители (табл. 2, 3).

Прочность эталонных образцов 356 кг/см^2.

Из табл. 2 и 3 видно, что большое снижение прочности малых образцов при испытании их на изгиб отмечалось во всех щелочных и кислых средах, а уже через 30 суток после погружения в агрессивную среду прочность образцов на молотом графите снизилась на 40–50% от исходной. Прочность образцов на молотом графите и молотом песке в органических растворителях (бензоле, толуоле, ацетоне, бензине) повысилась к 30–60 суткам выдерживания на 20–30 % от исходной.

Таблица 2

Химическая стойкость полимерраствора, приготовленного на основе ФД с графитным наполнителем при выдерживании образцов в агрессивных средах

Среда	Концентрация, %	Изменение прочности при изгибе через сутки, кг/см^2					
		30	60	90	120	180	360
Воздух	–	328	334	344	340	334	345
Соляная кислота	1	139	167	187	170	162	154
	10	123	221	150	160	165	180
Серная кислота	1	130	166	160	177	178	200
	10	156	177	158	–	167	150
Едкий натр	1	152	165	141	–	165	172
	10	160	221	193	–	208	210
Толуол	–	439	408	–	374	444	427
Бензол	–	453	411	–	393	315	409
Ацетон	–	407	412	–	423	398	430
Бензин	–	419	426	–	405	400	425

Таблица 3

Химическая стойкость полимерраствора, приготовленного на основе ФД, мономера ФА и молотого песка при выдерживании образцов в агрессивных средах

Среда	Изменение прочности при изгибе через сутки, кг/см²					
	Эталон, кг/см²	30	60	120	180	360
На смоле ФД						
Воздух	306	363	410	435	428	410
Толуол	–	352	418	386	403	415
Бензол	–	383	414	439	393	390
Ацетон	–	382	315	251	227	213
Бензин	–	390	370	375	320	390
На мономере ФА						
Воздух	378	324	344	294	265	290
Толуол	–	392	393	403	385	374
Бензол	–	428	441	378	401	408
Ацетон	–	108	81	65	60	54
Бензин	–	433	378	378	384	390

Полимербетонные образцы на мономере ФА и на молотом песке при выдерживании в ацетоне потеряли около 75%, а на молотом графите – около 10–15% своей первоначальной прочности (табл. 3).

Стойкость этих же образцов в органических растворителях (толуоле, бензоле, бензине) не изменилась по сравнению с исходной и в некоторых случаях несколько увеличивалась. Растворы едкого натра и некоторых кислот практически не вызывают снижения прочности. Снижается она через 30 суток при хранении образцов в воде. Далее прочность стабилизируется.

Испытание образцов на истираемость проводилось по стандартной методике на «круге Амслера». Образцы – кубы размером 7×7×7 см были изготовлены из составов 3 и 7. Заполнитель – 1 в.ч.; вяжущее 0,12 в.ч. – мономер ФА; отвердитель – 0,4 в.ч., БСК.

В качестве заполнителя использовался гравий крупностью 5–20 мм и молотый андезит в соотношениях 1,5:1 (табл. 4).

Методика определения водостойкости полимербетона проста. Образцы – кубики, балочки из полимербетона разных сроков хранения помещались в воду и в различные сроки хранения испытывались на сжатие. Эталонные образцы хранились в сухих условиях. Величина падения прочности образцов, хранившихся неодинаковое время в воде, характеризует водостойкость полимербетона. Для определения водостойкости полимербетона на смоле ФД готовились серии полимербетонных образцов – кубики и балочки на отвердителях разных видов и в различных количествах [19–22]. Результаты испытаний водостойкости этого состава в 28-дневном возрасте приведены в табл. 5; в 60-дневном – в табл. 6 и после сухого подогрева в течение 10 часов при температуре 80°С – в табл. 7.

Из данных таблиц легко вычислить коэффициенты размягчения $K_р$ и водостойкость $K_в$. Так, например, после 60 суток:

$$K_р = 980/1133 = 0.865;\ K_в = 1133/1180 = 0.96.$$

Таблица 4

Истираемость полимербетона различных составов при 600 м пути истирания (среднеарифметические данные по 6 образцам каждого состава)

№ составов	Вес образца до испытания, г	Вес образца после испытания, г	Площадь истирания, см²	Истираемость на 600 м/пути, г/см²	Истираемость цементного бетона М-200
7 3	754 742	746 735	49 49	0,16 0,14	0,6–1,2

Таблица 5
Изменение водостойкости полимербетона в возрасте 28 дней в зависимости от времени нахождения в воде

Тип отвердителя, количество от веса вяжущего, %	Предел прочности при сжатии до помещения образцов в воду, кг/см²	Предел прочности при сжатии образцов, хранившихся в воде в течение суток, кг/см²									
		30	60	90	120	150	180	270	360	540	720
Серная кислота, 30	1180	1060/1155	980/1133	910/1000	880/920	855/920	825/900	810/905	820/905	815/895	820/900
БСК, 50	1120	1060/1155	965/1065	912/1022	872/990	844/950	820/920	808/898	794/895	805/900	800/910
Комбинированный, 40	1260	1205/1115	1155/1045	1105/1000	1065/935	1045/200	1025/872	1015/859	1020/865	1010/854	1010/860

Таблица 6
Изменение водостойкости полимербетона в возрасте 60 суток в зависимости от времени нахождения в воде

Тип отвердителя, количество от веса вяжущего, %	Предел прочности при сжатии до помещения их в воду, кг/см²	Предел прочности при сжатии образцов, хранившихся в воде в течение суток, кг/см²			
		60	120	180	240
Серная кислота, 30	1220	1105	930	900	905
БСК, 50	1205	1160	1160	1109	1100
Комбинированный, 40	1295	1200	1150	1092	1096

Таблица 7
Изменение водостойкости полимербетона после его сухого подогрева при температуре 80°С в течение 10 часов в зависимости от времени нахождения в воде

Тип отвердителя, количество от веса вяжущего, %	Предел прочности при сжатии до помещения их в воду, кг/см²	Предел прочности при сжатии образцов, хранившихся в воде в течение суток, кг/см²				
		60	120	150	180	240
БСК, 50	1200	1160	1135	1122	1115	1108
Комбинированный, 40	1255	1185	1150	1137	1120	1125

Лучшие показатели водостойкости были получены при сухом подогреве образцов в течение 10 часов при температуре 80°С.

Для определения водостойкости полимербетона с крупным заполнителем изготавливались образцы состава № 3 (табл. 8). Составы были испытаны на водостойкость в минерализованных водах. В качестве минерализованной воды употреблялся 8% раствор сернокислого натрия (табл. 9). Падение прочности полимербетона в минерализованной воде происходит медленнее, чем в чистой [23, 24].

Коррозийное влияние полимербетона на стальную арматуру исследовали по следующей методике [25]. Изготавливались образцы–кубы из состава № 3 размером 10×10×10 см: заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит и гравий крупностью 20–40 мм в соотношении 1:1,5 по весу; вяжущее – 0,1 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,04 в.ч., комбинированный.

В процессе изготовления в каждый образец заделывали стальные шлифованные стержни диаметром 16 мм, длиной 80 мм. Перед бетонированием стержни очищали ацетоном и взвешивали. Образцы хранили в помещении при температуре воздуха 18–20°. После 12-месячного хранения часть образцов раздавливали, стержни извлекали и вновь тщательно взвешивали. Испытание оставшихся образцов производили в 18 и 24-месячном возрастах. Как было установлено, вес стержней не изменялся во времени. Не обнаружены и какие-либо следы коррозии на поверхности стержней. Следовательно,

Таблица 8
Изменение прочности полимербетона на смоле ФД при хранении в воде

№ состава	Предел прочности при сжатии образцов, кг/см²						
	до помещения их в воду	после хранения в воде в течение суток:					
		30	60	90	120	240	360
3	750	620	650	610	590	550	530

Таблица 9
Изменение прочности полимербетона на смоле ФД при хранении в минерализованной воде

№ состава	Предел прочности при сжатии образцов, кг/см²						
	до помещения в минеральную воду	после хранения в воде в течение суток:					
		30	60	90	120	240	360
3	780	715	680	650	670	640	620

среда полимербетона на смоле ФД не оказывает коррозирующего влияния на стальную арматуру [25].

В числителе даны результаты испытаний образцов во влажном состоянии, в знаменателе – результаты испытаний образцов, высушенных до постоянного веса.

Испытания на адгезию с металлической арматурой проводились методом выдергивания стальных стержней гладкого профиля при d = 16 мм марки А–1 из призм 10×10×20 см состава № 3. Глубина заделки стержней составляла 20 см. Выдерживание стержней производилось через 28 и 60 суток после изготовления образцов. Данные испытаний показали, что сцепление арматуры с полимербетоном составляет 108 кг/см² [25].

Модуль упругости полимербетона при сжатии определялся на призмах размером 7×7×22 см тензометрами с базой 20 мм, с ценой деления 1 мм, укрепленными с двух сторон, и индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Нагрузка осуществлялась ступенями, равными 0,1 R призменной. После каждой ступени давалась выдержка продолжительностью 5 мин. В виду упругого последействия отсчеты деформаций производились на каждой ступени дважды: в момент приложения нагрузки для замера упругих деформаций и после выдержки для замера пластической, остаточной деформации.

При растяжении модуль упругости определялся аналогичным путем на образцах-призмах размером 10×10×60 см, с утолщенными торцами. Среднеарифметические данные испытаний 5 образцов были следующими: призменная прочность – 850 кг/см², прочность при растяжении – 90 кг/см², модуль упругости при сжатии – 298 000 кг/см², а при растяжении – 160 000 кг/см².

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний показывают, что полимербетон на смоле ФД мало отличается от полимербетона на мономере ФА. Прочностные показатели у первого больше на 20–25%, а другие свойства малоотличимы.

Стоимость полимербетона на смоле ФД ниже стоимости полимербетона на смоле ФА на 10–15%. Важным преимуществом смолы ФД перед ФА является то, что для ее изготовления не требуется технологического оборудования и рабочей силы.

Для определения оптимальных составов смолы были проведены опыты, аналогичные опытам с дифениламином, и определено, что оптимальное соотношение фурфурола и отходов производства дифениламина – 1:0,75-1, а количество отвердителя (комбинированного) – 40% от веса смолы, которая условно названа нами смолой ФОД (табл. 10).

При исследовании свойств полимербетона на смоле ФОД обнаружено, что он обладает хорошей водостойкостью. Для испытания изготавливались образцы следующих составов:

8. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,25 в.ч., смола ФОД; отвердитель – 0,1 в.ч., комбинированный.

9. Заполнитель – 1 в.ч., гравий, песок, молотый песок в соотношении по весу 2,5:1,6:1; вяжущее – 0,15 в.ч., смола ФОД; отвердитель – 0,06 в.ч., комбинированный.

В качестве заполнителя использовался гравий крупностью 5–20 мм, песок Мк = 1,84. Из состава

Таблица 10
Основные свойства полимербетона и полимеррастворов

Физико-технические показатели	Единица измерения	На мономере ФА		На смоле ФД		На смоле ФОД	
		раствор	бетон	раствор	бетон	раствор	бетон
Объемный вес	г/см^3	2,0–2,1	2,1–2,.15	2,0–2,1	2,05–2,2	2,0–2,1	2,1–2,15
Предел прочности при сжатии	кг/см^2	800–1000	600–700	1100–1300	700–750	900–1000	650–750
Предел прочности при растяжении	кг/см^2	80–90	60–70	90–100	80–90	85–90	65–75
Растяжение при изгибе	кг/см^2	180–200	120–160	200–210	180–190	190–195	150–170
Удельная ударная вязкость	кг/см^2	1,8–2,0	2–3	1,8–2,0	2,5–3	1,8–2,0	2,2–3
Усадка линейная	мм/п.м	4,0–4,5	–	3,2–3,6	–	4,0–4,5	–
Усадка объемная	%	4,5–5	–	3,5–3,8	–	4,2–4,5	–
Модуль упругости	кг/см^2	–	200 000–250 000	–	270 000–290 000	–	210 000–240 000
Истираемость	г/см^2	–	0,350	–	0,214	–	0,008
Водопоглощение за 24 часа	% к весу	–	0,010	–	0,012	–	0,008
Водонепроницаемость	атм/сут.	–	18/90	–	18/90	–	18/90

Таблица 11
Изменение прочности полимербетона на смоле ФОД при хранении в воде

№ составов	Предел прочности образцов при сжатии, кг/см^2						
	до помещения в воду	после хранения в воде, сутки					
		30	60	90	120	180	360
8	930	870	840	810	790	765	750
9	550	510	490	475	470	450	460

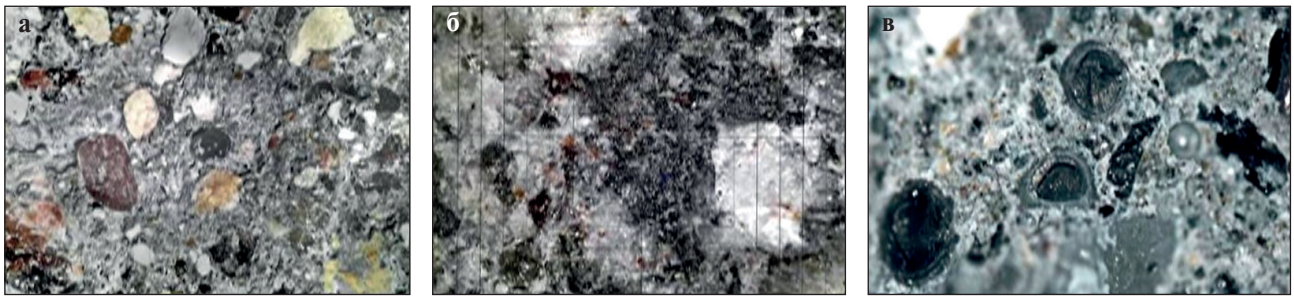

Рис. 7. **Микроструктура образцов полимербетона:** а – на мономере ФА; б – на смоле ФД; в – на смоле ФОД

№ 8 готовились кубы размером 3×3×3 см и из состава № 9 – 7×7×7 см. После хранения при комнатной температуре в течение 60 суток образцы были помещены в воду. Эталоны хранились в сухой среде (табл. 11).

Исследования микроструктуры полимербетонных образцов на мономере ФА, смоле ФД и ФОД выполнялись на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM7500 с приставкой рентгеноспектрального анализа (рис. 7). Полученные результаты коррелируются с выше приведенными экспериментальными данными. Изучение снимком показало, что все три образца имеют схожую структуру. Существенных отличий в структурах не наблюдается.

Предложенные новые образцы полимербетонов на смоле ФД и ФОД имеют улучшенные характеристики и не уступают полимербетону на мономере ФА по прочности, химической стойкости, износостойкости, водостойкости, истираемости и адгезии с металлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В предлагаемом способе изготовления полимербетона в качестве связующего предложено использовать обычный раствор одного химического продукта в другом. В данном случае не требуется затрат на осуществление технологических операций по получению связующего, и его стоимость будет почти такой же, как стоимость исходных продуктов.

2. Из сравнения технологий получения смолы ФД и изготовления полимербетона, а также из предварительных данных испытаний изучаемых материалов можно определить возможные технико-экономические преимущества полимербетона на смоле ФД перед применяемым в настоящее время в строительстве гидротехнических сооружений полимербетоном на мономере ФА.

3. Полимербетон на смоле ФД обладает высокой прочностью и превышает прочность полимербетона на мономере ФА на 20–25%.

4. Большим преимуществом полимербетона на связующем смеси фурфурола с отходами производства дифениламина по сравнению с другими видами полимербетонов может быть его низкая стоимость. Низкая стоимость полимербетона обусловливается малой стоимостью связующего, состоящего из 1 весовой части фурфурола и 0,75 весовой части отходов химического производства, которые отвозятся в отвал.

5. Технология изготовления полимербетона на связующем – смеси фурфурола и дифениламина, отходов производства дифениламина – аналогична технологии изготовления полимербетона на мономере ФА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jakiyayev BD, Moldamuratov ZN, Bayaliyeva GM, Ussenbayev BU, Yeskermessov ZE. Study of local erosion and development of effective structures of transverse bank protection structures. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2021; 9(3): 457–473. Available from: https://doi.org/10.21533/pen.v9i3.2191

2. Kryžanowski A, Mikoš M, Šušteršic J, Planinc, I. Abrasion resistance of concrete in hydraulic structures. *ACI Materials Journal*. 2009; 106(4): 349–356. Available from: https://doi.org/10.14359/56655

3. Balzannikov MI, Mikhasek AA. The use of modified composite materials in building hydraulic engineering structures. *In Procedia Engineering*. 2014; 91: 183–187. Elsevier Ltd. Available from: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.043

4. Mazgaleva A, Bobylskaya V, Reshetnikov M. Concrete Polymer Material for the Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures of Hydraulic Structures from Biological Damage. *In Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 402 LNNS: 1148–1158. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_126

5. Moldamuratov ZhN, Iglikov AA, Sennikov MN, Madaliyeva EB, Turalina MT. Irrigation channel lining using shotcrete with additives. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(3): 227–240. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-227-240. – EDN: BIEVUB.

6. Elshin IM. Polymer concretes in construction of hydraulic structures. *Hydrotechnical Construction*. 1981; 15(5): 269–272. Available from: Available from: https://doi.org/10.1007/BF01426730

7. Susilorini RM, Iskandar IR, Santosa BI. Long-Term Durability of Bio-Polymer Modified Concrete in Tidal Flooding Prone Area: A Challenge of Sustainable Concrete Materials. *Sustainability (Switzerland)*. 2022; 14(3): 1565. Available from: https://doi.org/10.3390/su14031565

8. Onyshchenko A, Garkusha M, Klymenko M. Analysis of design and construction of hydrotechnical structures of transport construction in the from of water pipes made of polimer matters. *Dorogi i Mosti*. 2021; 24: 112–133. Available from: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112

9. Galvão JCA, Portella KF, Joukoski A, Mendes R, Ferreira ES. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(2): 1049–1055. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073

10. Sennikov MN, Omarova GE, Moldamuratov ZN. Study of the development of soil in the formation of channels hydraulic and static stability of cross-sectional shapes. *World Applied Sciences Journal*. 2014; 30(1): 99–104. Available from: https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.01.14008

11. Mazitova AK, Aminova GK, Buylova EA, Zaripov II, Vikhareva IN. Biodegradable polymer materialsand modifying additives: state of the art. Part III. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(2): 73–78. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-73-78

12. Abdrakhmanova LA, Galeev RR, Khantimirov AG, Khozin VG. Efficiency of carbon nanostructures in the composition of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(3): 150–157. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157

13. Morozova MV, Ayzenshtadt AM, Akulova MV, Frolova MA, Shamanina AV. Evaluation of the possibility to use powders of polymineral silica-containing sands as a hydrophobizing coating. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(4): 222–228. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-222-228

14. Baldanov AB, Bokhoeva LA, Shalbuev DV, Tumurova TB. Collagen Based Bio-Additives in Polymer Composites. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(2): 137–144. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-137-144

15. Grzesiak S, Pahn M, Klingler A, Akpan EI, Schultz-Cornelius M, Wetzel B. Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Lamellas for Renovation of Concrete Structures. *Polymers*. 2022; 14(4): 790. Available from: https://doi.org/10.3390/polym14040790

16. Kujawa W, Tarach I, Olewnik-Kruszkowska E, Rudawska A. Effect of polymer additives on the microstructure and mechanical properties of self-leveling rubberised concrete. *Materials*. 2022; 15(1): 249. Available from: https://doi.org/10.3390/ma15010249

17. Bondarev BA, Pankov AE, Belyaev TK. The influence of structure forming factors on low-cycle fatigue of a polymer composite material based on furfural acetone monomer (FAM). *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019; 10(2): 119–125. Available from: https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.1.10

18. Gutarowska B, Kotynia R, Bieliński D, Anyszka R, Wreczycki J, Piotrowska M, Dziugan P. New sulfur organic polymer-concrete composites containing waste materials: Mechanical characteristics and resistance to biocorrosion. *Materials*. 2019; 12(16): 2602. Available from: https://doi.org/10.3390/ma12162602

19. Korneev AD, Meleshkin MF, Borkov PV. The durability of composite materials based on furfurolacetone monomer. *Construction Materials*. 2013; 15: 64–65.

20. Kumar A, Arora HC, Kapoor NR, Mohammed MA, Kumar K, Majumdar A, Thinnukool O. Compressive Strength Prediction of Lightweight Concrete: Machine Learning Models. *Sustainability (Switzerland)*. 2022. 14(4): 2404. Available from: https://doi.org/10.3390/su14042404

21. Flohr A, Osburg A. Design and Development of Concretes for Special Rehabilitation Tasks. *In MATEC Web of Conferences*. 2018; 199: 07001. EDP Sciences. Available from: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819907001

22. Jin-Min G, Yi W, Yi-Shun Z. Experimental research on modified polymer concrete. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014; 19: 4167–4176.

23. Gunasekaran M. Polymer-Impregnated Concrete Insulators/Insulating Structures. *In 2019 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC*. 2019; 193–196. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Available from: https://doi.org/10.1109/EIC43217.2019.9046588

24. Tchetgnia-Ngassam IL, Lespinasse F, Marceau S, Chaussadent T. Physico-chemical properties and durability of polymer modified repair materials. *In Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III – Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*. 2012. 916–921. Available from: https://doi.org/10.1201/b12750-152

25. Manapbayev B, Alimbayev B, Amanbayev E, Kabdushev A., Moldamuratov Zh. Study of internal corrosion on the turning angles in steel pipes. *E3S Web of Conferences*. 2021; 225:01004. Available from: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122501004

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Молдамуратов Жангазы Нуржанович – PhD, ассоциированный профессор, директор Центра науки, ТОО «Международная образовательная корпорация», Алматы, Казахстан, zhanga_m_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4573-1179

Имамбаева Райхан Сальтайевна – кандидат технических наук, академический профессор, декан факультета общего строительства, ТОО «Международная образовательная корпорация», Алматы, Казахстан, rimambayeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0806-3308

Имамбаев Нурлан Сальтаевич – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительство и дизайн», НАО «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Петропавловск, Казахстан, imambaevn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-8878

Игликов Алтайы Аманкулович – магистр, старший преподаватель кафедры «Строительство и производство материалов», НАО «Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати», Тараз Казахстан, altaiy_1976@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0134-6989

Таттибаев Сагынтай Жакыпалиевич – докторант образовательной программы «Гидротехническое строительство и сооружения», НАО «Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати», Тараз, Казахстан, tsagin75@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2687-0189

ВКЛАД АВТОРОВ

Молдамуратов Ж.Н. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; итоговые выводы.

Имамбаева Р.С. – написание статьи, научное редактирование текста.

Имамбаев Н.С. – проведение экспериментальных работ; обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Игликов А.А. – подготовка образцов, написание статьи, научное редактирование текста.

Таттибаев С.Ж. – проведение экспериментальных работ; обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.08.2022; одобрена после рецензирования 23.08.2022; принята к публикации 25.08.2022.

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-319-327

CC BY 4.0

Modification of portland cement with nanoadditives

Farit A. Agzamov*, **Aleksander Y. Grigoryev**
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Bashkortostan Republic, Russia
* Corresponding author: e-mail: faritag@yandex.ru

ABSTRACT: Introduction. Portland cement slurries (suspensions) used for well cementing have high water-cement ratios (0.45–0.6). They also contain a minimum amount of inert fillers, must have zero water separation and controlled hardening with a minimum time between the start and end of setting. **Literature review.** Most of the scientific work on the use of nano-additives in binder systems relates to the construction industry. Nanosilicon, nanotitanium, nanocarbonate, nanoclays, carbon nanofibers, etc. were widely used as modifiers of cement systems, which showed an increase in the strength characteristics of the resulting concretes. Literature review showed that there is a very wide range of concentrations of nanoadditives in cement systems from 0.001 to 10.0%. An increase in the strength of cement with high concentrations of additives in a number of publications is explained by a decrease in its capillary porosity due to clogging of the pore space. However, nanoadditives should not play the role of microfillers in the hardened stone. They should work in cement slurry at the stage of cement hydration and cement structure formation at concentrations less than 1.0%. **Results and Discussion.** The paper presents the results of experimental studies of the rheological properties and early strength of stone based on Portland cement with additives (0.01%) of nanocarbonate and nanoiron. The role of nanoadditives is to increase the rate of cement hydration by reducing the activation energy, and accelerating the dissolution of the solid phase in the liquid. Nanoadditives can be a "substrate" on which two-dimensional nuclei of a new phase are formed. The probability of the appearance of two-dimensional nuclei on the substrate is much higher than for the formation of three-dimensional nuclei of a new phase in the bulk of the solution. **Conclusion.** The results show an ambiguous effect of additives on the tested parameters, which indicates the need to optimize the amount of additives. One of the reasons for the ambiguity of the results may be high water-cement ratios, which reduce the likelihood of the formation of "constrained" conditions in cement slurries. At the same time, the effects of accelerated cement hydration are "levelled" and the number of contacts between hydration products is reduced.

KEYWORDS: nanoadditives, cement hydration, structure formation, rheology, compressive strength.

FOR CITATION: Agzamov F.A., Grigoryev A.Y. Modification of portland cement with nanoadditives. *Nanotechnologies in Construction.* 2022; 14(4): 319–327. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-319-327. – EDN: HJBEMK.

INTRODUCTION

The quality of cementing materials is one of the main factors affecting the quality of well completion, since the tightness and reliability of the cement sheath depends on the cement stone obtained in the well [1, 2].

The variety of geological and technical conditions for well construction determines the use of a wide range of modifying substances in plugging materials and solutions (hardening accelerators or retarders, plasticizers, fluid loss reducers, gas blockers, expanding and reinforcing substances, etc.) [3–5].

It is very important that additives of nanomaterials can significantly improve the quality of cements.

LITERATURE REVIEW

Features of the use of Portland cement in well cementing are that the applied slurries (suspensions) have high water-cement ratios (0.45–0.6). Oil well cements contain a minimum amount of inert fillers, but the resulting slurries must have zero water separation and controlled hardening with a minimum interval between the start and end of setting.

Among the first works devoted to the use of nano-additives in oil-well cements is the scientific work [6], which presents the results of using nano-iron in an amount of 0.01%, and shows an increase in the strength of the resulting cement stone by 25–35%.

© Agzamov F.A., Grigoryev A.Y., 2022

B.A. Suleimanov and E.F. Veliyev [7] studied the effect of particle size distribution of nanosized additives on the quality of cementing. They showed the superiority of nanoadditives SiO_2 (0.3–1.5%) and TiO_2 (0.5–2.0%) in terms of their effect on the strength of the stone compared to increasing the fineness of Portland cement.

The articles [8, 9, 11] should also be noted. In particular, in [8], the use of nanoclay in an amount of 1–3% in cement slurries for casing wells at high temperatures was discussed, and it was shown that the strength increases in compression and improves the rheological properties of the slurry. The article [9] considered the possibility of using a patented nanoadditive to increase the elasticity of the stone. The authors believe that nanoadditives contribute to the creation of long acicular crystalline structures. These structures crosslink, block capillary pores, increase the flexural strength of the cement stone, and also enhance the dynamics of cement hydration. The "modification of the cement hydration process" should take place during the first 48 hours of thickening. This is consistent with the results of a study of expanding cements [10]. This article shows that the processes of hydration of expanding additives must occur during the period of the "elastic" structure of the stone, capable of healing the formed defects.

According to article [11], an increase of the corrosion resistance (acid resistance) of a cement stone containing 1% nanosilica was experimentally proved.

At the same time, nanoadditives have not yet found wide application in well cementing. In our opinion, this is due to the specific conditions of the work. There is also a large uncertainty in the evaluation of the results obtained regarding the quality of the resulting stone in downhole conditions. The technology of using nanoadditives limits their widespread use in production.

It should be noted that the bulk of research work on the use of nano-additives in binder systems relates to the construction industry.

The most complete review of works of the using of nanoadditives in binder systems used for the preparation of concrete is given in reviews [12–14].

Among the nanomaterials used in the modification of cement systems, nanosilicon [15–16], nanotitanium [17], nanoiron [15, 16, 18], nanocarbonate [19–21], nanoclays [8, 13], carbon nanofibers [22] and some others.

At the same time, most authors noted an increase in the strength parameters of the resulting concretes.

While analyzing of works devoted to the using of nanosized additives in cement systems, there is the question about the mechanism of their action and their rational amount.

Some papers present the results of studies using nanoadditives in the amount of 3.0–10.0% [15, 19, 21]. Explaining the improvement of stone properties by reducing its capillary porosity, the authors are actually talking about microadditives that perform the specified role in concrete. It seems to us that nanoadditives should work at the stage of hydration and structure formation of cements, and the amount of additives should be tenths or hundredths of a percent.

The effect of nanoadditives on the hydration kinetics of cements was discussed in [23, 24], in which these additives were considered as seeds for activating the process of cement hydration.

When studying the effect of various nano-additives on cement hydration, it was shown that many of them accelerate cement hydration by 10–30 times due to a decrease in activation energy by approximately 2–3 times. At the same time, a stone made from modified cement at a concentration of (0.01%) after 28 days of hardening had an increase in strength characteristics by 45–65%, depending on the type of additives. The use of SiO_2 as a nanomodifier ensured the completion of the hardening process on the first day due to the crystallochemical structure of the neoplasms [25].

The article [19] describes the acceleration of the hydration process of binders in the presence of additives of nanomaterials. The products of cement hydration settle on nanoparticles due to their high surface energy and begin to grow. In this case, a conglomerate containing nanoparticles as a "core" is formed. The earlier such nuclei form, the sooner they can grow to larger hydration crystals and accelerate the hydration of the cement. Due to the high dispersity, nanoparticles have a very large specific surface area, are highly reactive, and can act as crystallization centers.

To control the kinetics of hydration, the calorimetry method was used, which showed a significant acceleration of the hydration of Portland cement by the addition of nanocalcium carbonate. At the same time, according to the data of thermogravimetric analysis, the amount of $CaCO_3$ decreased with hydration, although no new products were detected by XRF.

The process of hydration of Portland cement consists of two opposite processes – dissolution of the cement substance in a dispersed mixture and crystallization of solid products from a supersaturated solution [26, 27]. The formation and crystallization of hydration products occurs spontaneously and is due to the chaotic movement of molecules in solution, as well as the release of "constrained" conditions [28, 29].

Based on the consideration of articles [28, 29, 30], a possible mechanism of action of nanoadditives on the processes of structure formation of cement mortars seems to be as follows.

The probability of the appearance of a new phase nucleus is described by the Folmer formula:

$$w_i = w_0 \exp\left(-\frac{A_i}{kT}\right),$$

где w_0 – pre-exponential factor; A_i – energy of formation of a nucleus of a new phase; k – Boltzmann's constant; T – absolute temperature.

To increase the probability of the emergence of a new phase, ceteris paribus, it is necessary to reduce the energy of formation of nuclei in the volume, which is proportional to the surface area of the nucleus and the specific surface energy of the neoplasm:

$$A_з = \frac{1}{3} S\sigma,$$

где S – surface area of the nucleus; σ – specific surface energy of neoplasm.

The work of nucleation on the substrate is much smaller and equal to $^1/_2$ of the peripheral energy:

$$A_2 = \frac{1}{2} U æ \sim \frac{1}{2} \delta\sigma,$$

где U – nucleus perimeter; δ – thickness of the monomolecular layer; $æ \sim \delta\sigma$ – specific edge energy.

Due to the lower expenditure of energy for the formation of nuclei at the phase boundary, the probability of their formation on the substrate is higher than when they are formed in the volume of the slurry.

The size of a stable nucleus of a new phase is determined by the Thomson-Kelvin equation:

$$r_{кр} = \frac{2M\sigma}{RT\ln\alpha},$$

где $r_{кр}$ – stable critical size of the nucleus; M – molar mass; σ – surface tension at the interface; R – universal gas constant; T – temperature; α – degree of supersaturation of the solution.

For the formation and further existence of smaller nuclei on the "substrate", it is necessary to reduce the interfacial energy between them. It will be minimal if the surface of the interfaces is large and its energy unsaturation, as well as if the crystal chemical characteristics of the material that creates these boundaries are identical to the precipitated phase [30].

According to Polak A.F. [29] the measure of crystal chemical congruence between the substrate and the new phase can be the coefficient of physicochemical inhomogeneity:

$$x = \frac{\sigma_2 + \sigma_{1-2} - \sigma_1}{\sigma_2}.$$

If the substrate and neoplasm are completely congruent, i.e. $\sigma_1 = \sigma_2$, then $\sigma_{1-2} = 0$, hence $x = 0$. If no bonds arise between them, then the interfacial energy is calculated as the sum of the interfacial energies of the substrate and the new phase in the contact area, i.e. $\sigma_{1-2} = \sigma_1 + \sigma_2$, and $x = 2$. The work of nucleation directly depends on the coefficient of physicochemical inhomogeneity ($A \sim x$), and even a insignificant decrease in the energy intensity of the process leads to the probability of the appearance of a new phase nucleus by tens and hundreds of thousands of times [29].

When the structure of the cement slurry is gaining strength, the formation of a coagulation structure initially occurs, followed by the intergrowth of crystalline hydrates and the formation of a structure from calcium hydrosilicates [26].

The addition of nanopowders to this system makes it possible to increase the number of "substrates" (crystallization centers) due to the appearance of particles related in structure and composition. This mechanism is observed in the first hours of hardening – from 8 to 24 hours. This is due to the high chemical activity and the mechanism associated with the direct participation of particles in the processes of phase formation of hydrates.

Exceeding of the concentration of nanoadditives in the cementing system can lead to the opposite effect – a slowdown in the rate of hardening and a decrease in strength characteristics. This is due to the fact that with an increase in the specific surface area and, consequently, chemical activity, nanoparticles similar in composition to Portland cement bind water with the creation of sparingly soluble crystalline hydrates, reducing the amount of water for cement hydration [31].

METHODS AND MATERIALS

During the scientific study, measurement methods were used in accordance with ISO-10426-2-2003. In particular, the measurement of the rheology of solutions and compressive strength.

The rheological characteristics were measured at 24, 30 and 60°C on a Fann viscometer model 35SA-SR12. Measurements on a Fann 420ATC ultrasonic strength analyzer were performed with similar temperature conditions and a pressure of 3000 psi.

The compressive strength of the mortar and stone structure was measured using an ultrasonic strength analyzer Fann 420 ATC.

The study was carried out using Portland cement 1-G-CC-1 manufactured by Dyckerhoff LLC with the addition of calcium carbonate and iron nanopowders. The particle size of the carbonate nanopowder is 60–80 nm, the $CaCO_3$ content is ⩾ 98%. The particle size of the iron nanopowder is 50–110 nm, the Fe content is ⩾ 99.8%, the content is 0.01% by weight of dry cement.

The choice of these powders is due to the possibility of participating in the hydration process as hardening initiators. Also, these additives can serve as a substrate for the formation of nuclei of a new phase [28, 29].

The water-cement ratio of the solutions was 0.45. The density of cement mortars was 1.87 g/cm^3. A surfactant and a defoamer were also added to the solution in an amount of 0.01% by weight of dry cement.

RESULTS

With the addition of calcium nanocarbonate, a slight increase in rheological parameters was observed. When nanoiron was added, the parameters were almost identical at different temperature conditions (Table 1).

Graphs of changes in the strength of cement stone, which were obtained on an ultrasonic strength analyzer, are shown in Fig. 1–6 and Table 2.

Table 3 shows the relative change in the strength of cement stone with nano additives relative to cement without additives.

Table 1
Rheological characteristics of cement slurries

№	Additive	Temperature	PV, mPa*s	YP, Па	1-to-10-min gel strength ratio, Pa
1	Without additives	24	18	15.3	7/12
		30	36	11.5	6/7
		60	24	22	7/9
2	Nano $CaCO_3$ 0.01%	24	29.3	11	7/10
		30	27.8	13.9	6/10
		60	27.8	23.9	7/18
3	Nano Fe 0.01%	24	27.8	10.5	8/47
		30	29.3	12.5	5/7
		60	31.5	15.3	7/9

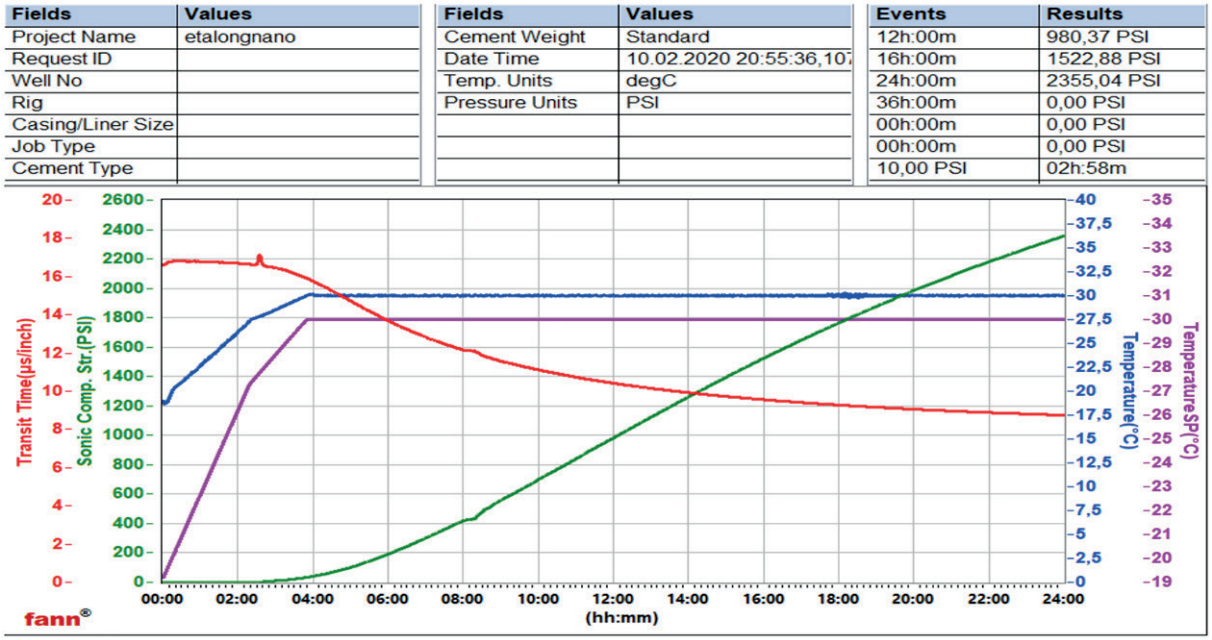

Fig. 1. **Change in compressive strength of stone from additive-free Portland cement at 30°C**

Fields	Values
Project Name	nanoca001
Request ID	
Well No	
Rig	
Casing/Liner Size	
Job Type	
Cement Type	

Fields	Values
Cement Weight	Standard
Date Time	01.02.2020 18:47:06,225
Temp. Units	degC
Pressure Units	PSI

Events	Results
12h:00m	553,72 PSI
16h:00m	907,02 PSI
24h:00m	1569,53 PSI
36h:00m	0,00 PSI
00h:00m	0,00 PSI
00h:00m	0,00 PSI
10,00 PSI	03h:30m

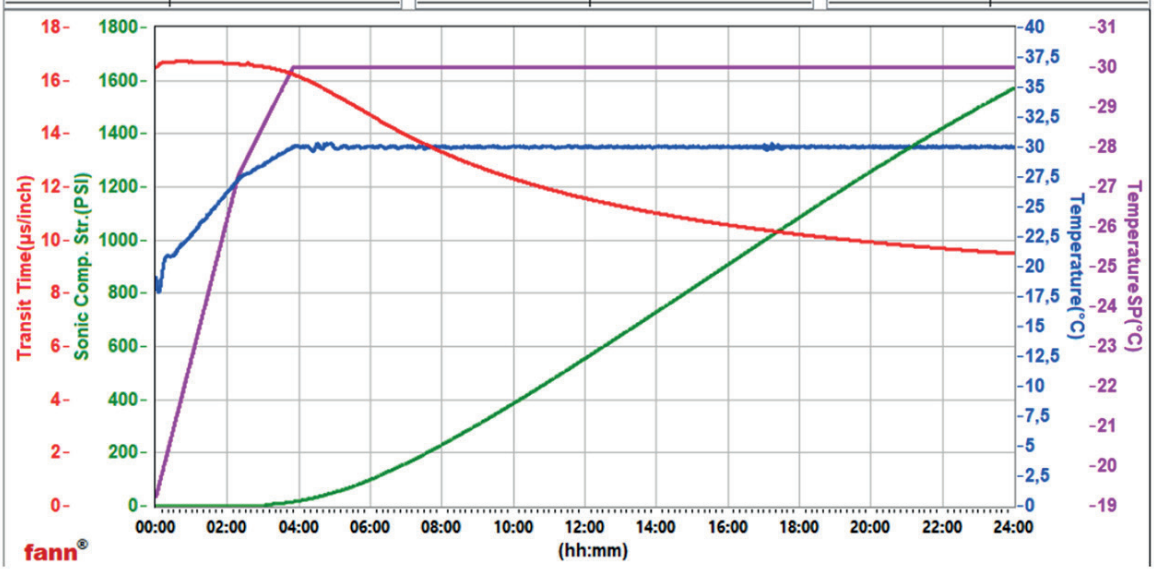

Fig. 2. **Change in compressive strength of Portland cement stone with 0.01% calcium carbonate nanopowder at 30°C**

Fields	Values
Project Name	nanofe001
Request ID	
Well No	
Rig	
Casing/Liner Size	
Job Type	
Cement Type	

Fields	Values
Cement Weight	Standard
Date Time	08.02.2020 16:40:13,316
Temp. Units	degC
Pressure Units	PSI

Events	Results
12h:00m	1012,56 PSI
16h:00m	1581,19 PSI
24h:00m	2440,82 PSI
36h:00m	0,00 PSI
50,00 PSI	04h:12m
500,00 PSI	08h:30m
1000,00 PSI	11h:54m

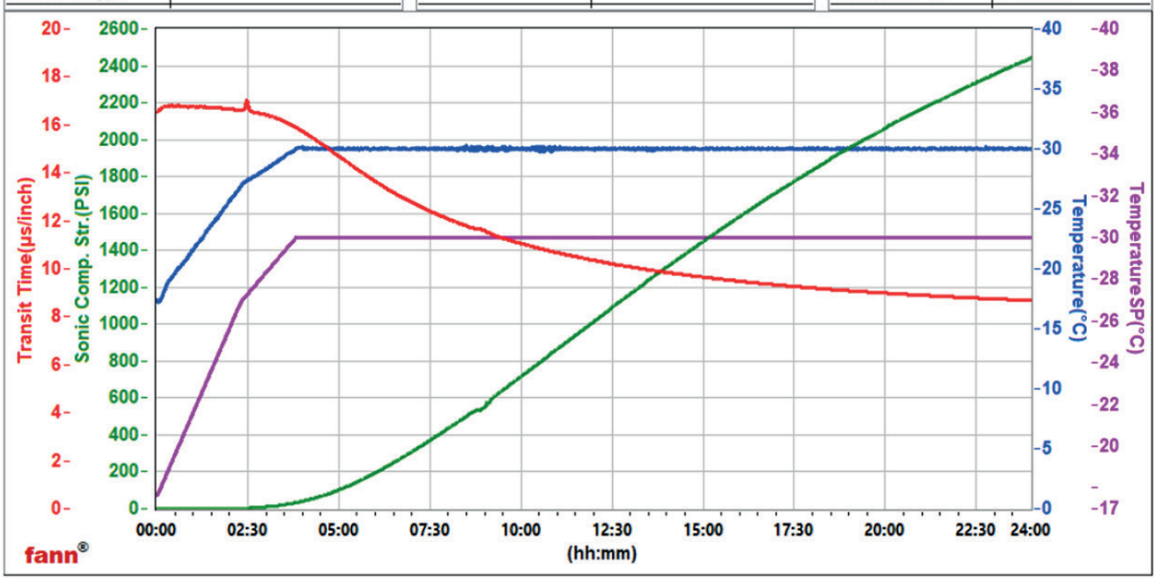

Fig. 3. **Change in compressive strength of Portland cement stone with 0.01% nano iron powder at 30°C**

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	etalongnano60gr	Cement Weight	Standard	12h:00m	2567,40 PSI
Request ID		Date Time	13.02.2020 20:59:04,71	16h:00m	2958,12 PSI
Well No		Temp. Units	degC	24h:00m	3437,98 PSI
Rig		Pressure Units	PSI	36h:00m	0,00 PSI
Casing/Liner Size				00h:00m	0,00 PSI
Job Type				00h:00m	0,00 PSI
Cement Type				10,00 PSI	01h:47m

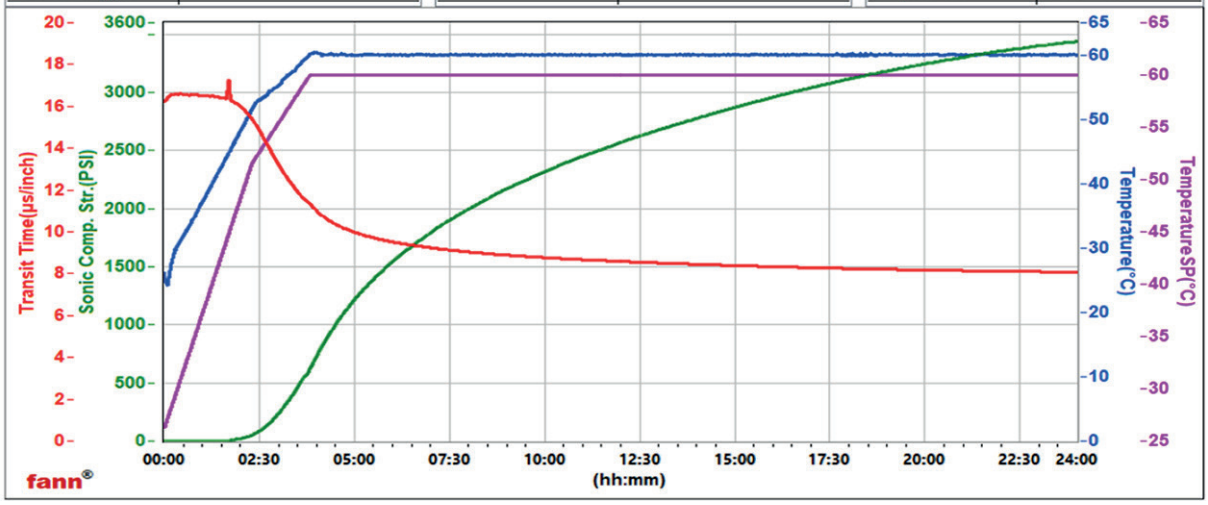

Fig. 4. **Change in compressive strength of stone from additive-free Portland cement at 60°C**

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	nanoca001_60gr	Cement Weight	Standard	12h:00m	3181,06 PSI
Request ID		Date Time	02.02.2020 20:37:41,86	16h:00m	3609,46 PSI
Well No		Temp. Units	degC	24h:00m	4100,79 PSI
Rig		Pressure Units	PSI	36h:00m	0,00 PSI
Casing/Liner Size				00h:00m	0,00 PSI
Job Type				00h:00m	0,00 PSI
Cement Type				10,00 PSI	01h:15m

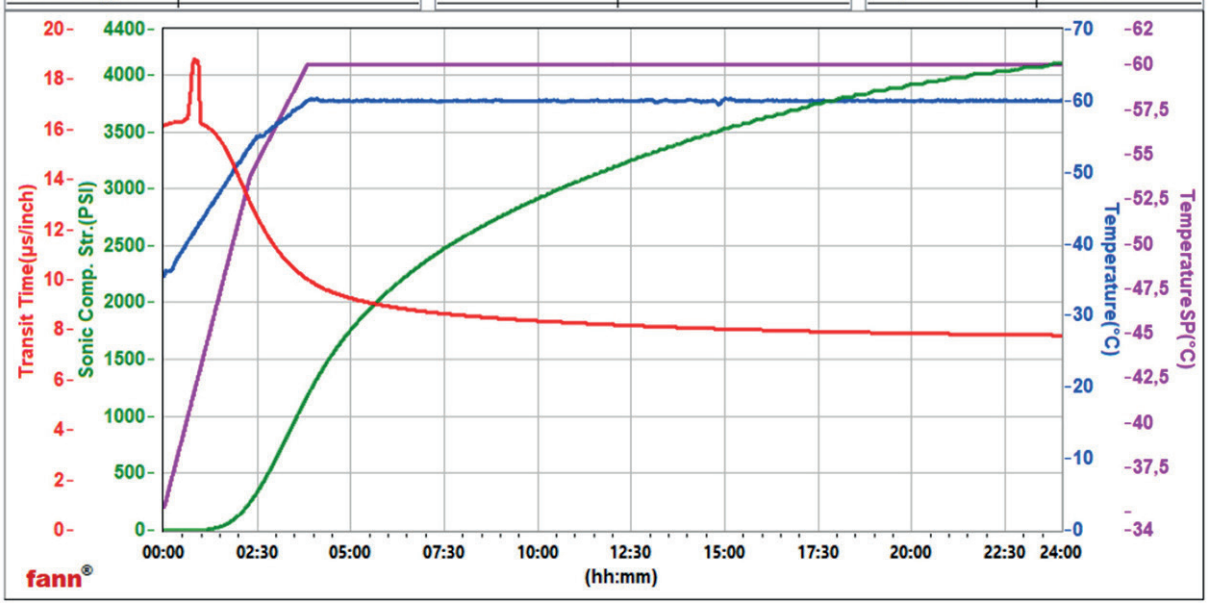

Fig. 5. **Change in compressive strength of Portland cement stone with 0.01% calcium carbonate nanopowder at 60°C**

Fields	Values
Project Name	nanofe001_60gr
Request ID	
Well No	
Rig	
Casing/Liner Size	
Job Type	
Cement Type	

Fields	Values
Cement Weight	Standard
Date Time	09.02.2020 18:24:36,106
Temp. Units	degC
Pressure Units	PSI

Events	Results
12h:00m	2651,51 PSI
16h:00m	3026,36 PSI
24h:00m	3475,63 PSI
00h:05m	3475,63 PSI
05h:00m	3475,69 PSI
29h:00m	0,00 PSI
10,00 PSI	01h:47m

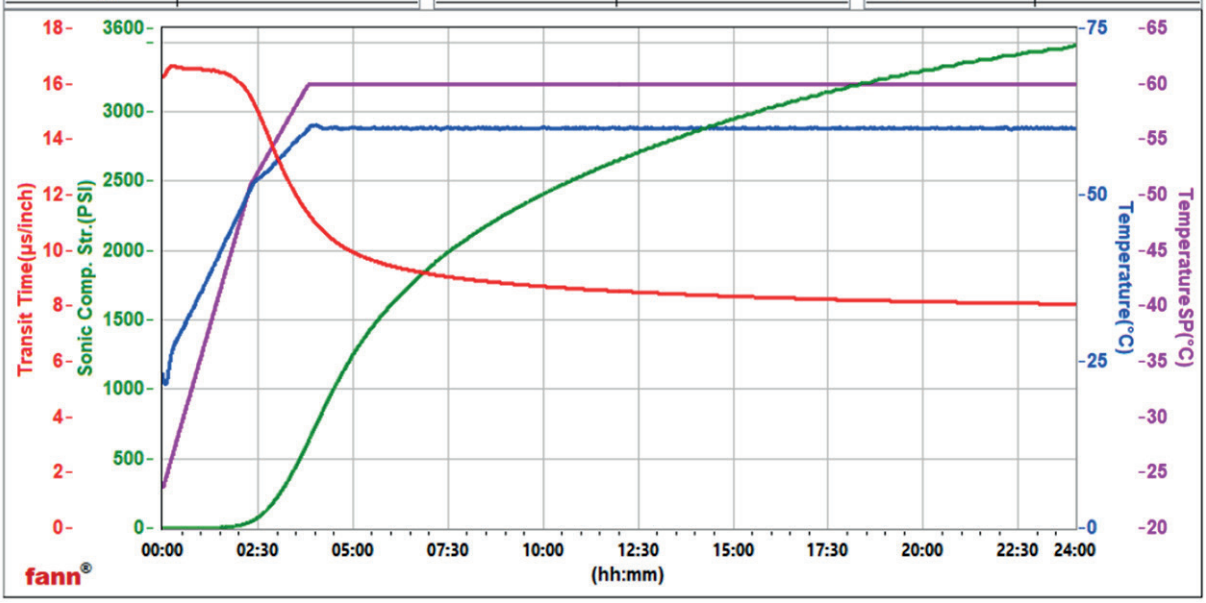

Fig. 6. **Change in compressive strength of Portland cement stone with 0.01% nano iron powder at 60°C**

Table 2
Strength of cement stone with nano additives

№	Additive	T, °C	Compressive strength, MPa in an hour		
			12 hour	16 hour	24 hour
1	Without additives	30	6.76	10.5	16.24
		60	17.7	20.4	23.7
2	Nano $CaCO_3$ 0.01%	30	3.82	6.25	10.82
		60	21.93	24.89	28.28
3	Nano Fe 0.01%	30	6.98	10.9	16.83
		60	18.28	20.87	23.97

Table 3
Relative change in cement stone strength

№	Additive	T, °C	Compressive strength, MPa in an hour		
			12 hour	16 hour	24 hour
1	Nano $CaCO_3$ 0.01%	30	–43.5	–40.4	–33.3
		60	23.9	22.0	19.3
2	Nano Fe 0.01%	30	3.3	3.8	3.64
		60	3.3	2.3	1.1

ANALYSIS

According to the results of rheological studies, an increase in plastic viscosity with increasing temperature is observed, while the yield point decreases.

The addition of nanocarbonate content in an amount of 0.01% had a negative effect on the increase in compressive strength at 30°C (–33.35% after 24 hours), however, at a given temperature up to 60°C, the increase in strength was positive (+19, 28% after 24 hours). Similar results have been observed by other researchers. A possible reason is the formation of calcium hydrocarboaluminate, which adversely affected the strength in the initial period of hardening.

On the contrary, the addition of iron nanopowder in the amount of 0.01% shows a slight positive increase in strength both at 30 and 60°C (3.64% and 1.1%, respectively, in 24 hours).

CONCLUSIONS

1. It is efficient to provide experiments for optimization of cement with nanoadditives.

2. After identifying the optimal concentration (which shows the most level of increase in compressive strength) of nanoadditives it is necessary to conduct testing to clarify the sedimentation stability of the solution.

3. Changes in the rheological properties of cement slurries modified with nanoadditives are insignificant compared to the reference slurry.

4. The dynamics of changes in the strength of the cement slurry with the addition of iron nanopowder at 30 and 60°C is insignificant. Therefore, this additive does not participate in the hydration process and can only affect the reduction in the porosity of the cement stone, filling the voids in the crystal lattice, making it more uniform and dense.

5. The decrease in the strength of cement stone with the addition of calcium carbonate nanopowder at 30°C is explained by insufficient energy for activation. At a temperature of 60°C, the dynamics is positive, which indicates that an increase in temperature increases the probability of the emergence of a new phase nucleus. In this case, the formation of nuclei occurs on “substrates” related to hydration products.

REFERENCES

1. Bulatov AI. *Detective biography of the tightness of the support of wells*. Krasnodar, Prosveshchenie-Yug; 2008.

2. Danyushevskiy V.S. Design of optimal structures grouting cements. M.: Nedra, 1978.

3. Agzamov FA, Kabdushev AA, Komleva SF, Bayutenov NA. Use of cement sludges with reduced fluid losses for cementing wells in Kazakhstan. *Pollution Research*. 2016; 35(4): 891–896.

4. Agzamov FA, Ismagilova ER, Self-healing cements are the key to maintaining the tightness of the well support. Part 1. *Nanotechnologies in Construction*. 2019;11(5): 394 –402. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-5-394-402.

5. Bekbaev AA, Agzamov FA. Dispersed reinforcement as a factor in improving the quality of lightweight cement mortars. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*. 2018; 8: 38–42.

6. Yusifzadeh HQ, Edwards EJ, Shahbazov Jr, Kaziov AA. *Technologies of Oil and Gas Well Drilling*. Baku: 2014.

7. Suleymanov BA, Veliev EF. On the influence of granulometric composition and nanoscale additives on the quality of insulation of the tube space in the process of cementing wells. *Proceedings of SOCAR*. 2016;4: 4–10. Available from: https://doi.org/10.5510/OGP20160400293.

8. Murtaza M, Rahman M, Al-Majed A. Effect of nanoclays on mechanical and rheological properties of cement sludge of oil wells in HPHT environment. *International Conference on Petroleum Technologies*. 2016. Available from: https://doi.org/10.2523/IPTC-18989-MS.

9. De la Roij R. Egyed C, Lips JP. Nano-engineered oil wells cement improves flexibility and increases compressive strength: a laboratory study. *Society of Petroleum Engineers*. 2012. Available from: https://doi.org/10.2118/156501-MS.

10. Kravchenko IV, Kuznetsova TV, Vlasova NG, Yudovich BE. Chemistry and technology of special cements. – M.: Stroyizdat, 1979.

11. Ridha S, Yerikania U. New nano-geopolymer cement system improves wellbore integrity upon acidizing job: experimental results. *Society of Petroleum Engineers*. 2015. Available from: https://doi.org/10.2118/176419-MS.

12. Sanchez F, Sobolev K. Nanotechnologies in concrete. A review. *Construction and construction materials*. 2010;24(11): 2060–2071. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014.

13. Muhd Norhasri MS, Hamidah MS, Mohd Fadzil A. Applications of using nanomaterial in concrete: A review. *Construction and building materials*. 2017;133: 91–97. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005.

14. *Nanotechnology in cement-based construction*. Edited by Antonella D'A, Annibale LM, Filippo U. Imprint by Jenny Stanford Publishing. Available from: https://doi.org/10.1201/9780429328497.

15. Oltulu M, Sahin R. Single and combined effects of nano-SiO_2, nano-Al_2O_3 and nano-Fe_2O_3 powders on the compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. *Materials Science and Engineering*. 2011;528(22–23): 7012–7019. Available from: https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.054.

16. Hui Li, Hui-gang Xiao, Jie Yuan, Jinping Ou. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*. 2004; 35 (2):185–189. Available from: https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0.

17. Jalal M, Fathi M, Farzad M. Effected of fly ash and TiO_2 nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high-strength self-compacting concrete. *Mechanics of materials*. 2013;61: 11–27. Available from: https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.01.010.

18. Shiho Kawashima, Pengkun Hou, David J.Corr, Shah SP. Modification of cement-based materials with nanoparticles. *Cement and concrete composites*. 2013;36: 8–15. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.012.

19. Xiaoyan Liu, Lei Chen, Aihua Liu, Xinrui Wang. Influence of Nano-$CaCO_3$ on the properties of cement paste. *Energy Process*. 2012; 16(B): 991–996. Available from: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.158.

20. Sato T, Diallo F. Seeding effect of nano-$CaCO_3$ on the hydration of tricalcium silicate. *Journal of the Transportation Research Board*. 2010; (2141): 61–67. Available from: https://doi.org/10.3141/2141-11.

21. Sato T, Beaudoin JJ. Effect of nano-$CaCO_3$ on the hydration of cement-containing additional cementing materials. *Advances in Cement Research*. 2011; 23(1): 33–43. Available from: https://doi.org/10.1680/adcr.9.00016.

22. Metaxa Z, Konsta-Gdoutos M, Shah SP. Mechanical properties and nanostructure of cement-based materials reinforced with carbon nanofibers and polyvinyl alcohol (PVA) microfibers. Materials Science. *Polymer Journal*. 2010. Available from: https://doi.org/10.14359/51663743.

23. Gerrit L, Dietmar S. Control cement hydration with nanoparticles. *Cement and concrete composites*. 2015;57: 64–67. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.003.

24. Artioli G, Ferrari G, Dalkoni MC, Valentini L. Nanosemines as modifiersof the cement hydration kinetics. *Materials Science*. 2020. Available from: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00010-6.

25. Ledenev VV, Yartsev VP, Strulev SA, Odnolko VG. The influence of nanomodification on the strength and mobility of cement concretes and the development of foam concrete. *Voprosy sovremennoi nauki i praktika*. 2012;37(1): 24–29.

26. Taylor H. *Khimiya cementov*. M.:Stroyizdat;1969.

27. Mchedlov-Petrosyan OP. Modern views on the processes of cement hardening. New in the technology and technique of cement production. *Proceedings of the Yuzhgiprocemet Institute*. M.: Gosstroyizdat;1963: 144–152.

28. Ratinov VB, Rosenberg TI. *Additives to concrete*. M.: Stroyizdat;1973.

29. Polak AF, *Physical and chemical bases of corrosion of reinforced concrete. Elementary corrosion processes: training*. Ufa State Petroleum Technological University;1982.

30. Kuznetsova TV, Kudryashov IV, Timashev VV. *Physical chemistry of astringent materials: a textbook for chem.-technol*. M.: Vysshaya. shk.;1989.

31. Chernyshov EM, Artamonova OV, Slavcheva GS. Nanomodification of cement-based composites in the technological life cycle. *Nanotechnology in construction*. 2020;12(3): 130–139. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Farit A. Agzamov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department «Oil and Gas Well Drilling», Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Bashkortostan Republic, Russia, faritag@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5850-5261

Aleksander Y. Grigoryev – Graduate student of the Department «Oil and Gas Well Drilling», Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Bashkortostan Republic, Russia, alexgrigu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5247-1216

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Farit A. Agsamov – writing an article, scientific editing of text, identifying dependencies.

Aleksander Y. Grigoryev – preparation of prototypes, conducting experiments, identifying dependencies.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 08.06.2022; approved after reviewing 27.06.2022; accepted for publication 04.07.2022.

Научная статья
УДК 666.49.9: 622.24
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-319-327

CC BY 4.0

Модификация тампонажного портландцемента нанодобавками

Фарит Акрамович Агзамов*, Александр Юрьевич Григорьев
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: faritag@yandex.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Применяемые при цементировании скважин растворы (суспензии) портландцемента имеют высокие водоцементные отношения (0,45–0,6). Также они содержат минимальное количество инертных наполнителей, должны иметь нулевое водоотделение и регулируемое твердение с минимальным временем между началом и концом схватывания. **Состояние вопроса.** Основная часть работ по использованию нанодобавок в вяжущих системах относится к строительной отрасли. В качестве модификаторов цементных систем широкое применение имели нанокремний, нанотитан, нанокарбонат, наноглины, углеродные нановолокна и др., которые показывали повышение прочностных показателей получаемых бетонов. В литературе приведен широкий диапазон концентраций нанодобавок в цементные системы от 0,001 до 10,0%. Повышение прочности цементного камня при больших концентрациях добавок в ряде публикаций объясняется уменьшением его капиллярной пористости за счет кольматации порового пространства. Однако нанодобавки не должны выполнять роль микронаполнителей в затвердевшем камне. Они должны работать в цементном растворе на этапе гидратации цемента и структурообразования раствора при концентрациях менее 1,0%. **Результаты и обсуждение.** Приводятся результаты экспериментальных исследований реологических свойств и ранней прочности камня на основе портландцемента с добавками (0,01%) нанокарбоната и наножелеза. Роль нанодобавок заключается в повышении скорости гидратации цемента за счет снижения энергии активации и ускорения растворения твердой фазы в жидкости. Нанодобавки могут являться «подложкой», на которой образуются двумерные зародыши новой фазы. Вероятность появления двумерных зародышей на подложке на несколько порядков выше, чем для образования трехмерных зародышей новой фазы в объеме раствора. **Заключение.** Полученные результаты показали неоднозначное влияние добавок на тестируемые показатели, что свидетельствует о необходимости оптимизации количества добавок. Одной из причин неоднозначности результатов могут быть высокие водоцементные отношения, снижающие вероятность образования «стесненных» условий в цементных суспензиях. При этом «нивелируются» эффекты от ускорения гидратации цемента и уменьшается количество контактов между продуктами гидратации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанодобавки, гидратация цементов, структурообразование, реология, прочность камня.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Агзамов Ф.А., Григорьев А.Ю. Модификация тампонажного портландцемента нанодобавками // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 319–327. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-319-327. – EDN: HJBEMK.

ВВЕДЕНИЕ

Качество тампонажных материалов является одним из основных факторов, влияющим на качество заканчивания скважины, поскольку именно от полученного в скважине цементного камня зависит герметичность и надежность крепи [1, 2].

Многообразие геолого-технических условий строительства скважин обуславливает применение в тампонажных материалах и растворах широкого спектра модифицирующих добавок (ускорителей или замедлителей твердения, пластификаторов, понизителей водоотдачи, газоблокаторов, расширяющих и армирующих добавок и др.) [3–5].

При этом большой интерес представляют добавки наноматериалов, которые могут существенно улучшить качество применяемых цементов.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Особенности применения портландцемента при цементировании скважин состоят в том, что применяемые растворы (суспензии) имеют высокие водоцементные отношения (0,45–0,6). Тампонажные

© Агзамов Ф.А., Григорьев А.Ю., 2022

цементы содержат минимальное количество инертных наполнителей, но получаемые растворы должны иметь нулевое водоотделение и регулируемое твердение с минимальным интервалом между началом и концом схватывания.

Среди первых работ, посвященных применению нанодобавок в тампонажных цементах, можно выделить работу [6], где приводятся результаты использования наножелеза в количестве 0,01%, и показано увеличение прочности получаемого цементного камня на 25–35%.

Также следует отметить работу Б.А. Сулейманова и Э.Ф. Велиева [7], которые исследовали влияние гранулометрического состава наноразмерных добавок на качество цементирования. Они показали превосходство нанодобавок SiO_2 (0,3–1,5%) и TiO_2 (0,5–2,0%) по влиянию на прочность камня по сравнению с повышением дисперсности портландцемента.

Следует также отметить работы [8, 9, 11]. В частности, в [8] обсуждалось применение наноглины в количестве 1–3% в цементных растворах для крепления скважин в условиях высоких температур. Авторы показали повышение прочности камня на сжатие и улучшение реологических свойств раствора. В статье [9] рассматривалась возможность применения патентованной нанодобавки для повышения эластичности камня. Авторы полагают, что нанодобавки способствуют созданию длинных игольчатых кристаллических структур. Последние, сшиваясь, блокируют капиллярные поры, повышают изгибную прочность цементного камня, а также усиливают динамику гидратации цемента. При этом показано, что «модификация процесса гидратации цемента» должна проходить в течение первых 48 часов твердения. Это согласуется с результатами исследования расширяющихся цементов [10]. В них показано, что процессы гидратации расширяющих добавок должны произойти в период «эластичной» структуры камня, способной к заживлению образовавшихся дефектов.

В работе [11] экспериментально показано повышение коррозионной стойкости (кислотостойкости) цементного камня, содержащего 1% нанокремнезема.

В то же время при креплении скважин нанодобавки еще не нашли широкого применения. По нашему мнению, это связано со специфическими условиями проведения работ. Также присутствует большая неопределенность в оценке полученных результатов относительно качества получаемого камня в скважинных условиях. Технология применения нанодобавок на производстве ограничивает их широкое применение.

Основная часть работ по использованию нанодобавок в вяжущих системах относится к строительной отрасли.

Наиболее полные обзоры по применению нанодобавок в вяжущих для приготовления бетонов приведены в работах [12–14].

Среди наноматериалов, использованных при модификации цементных систем, наиболее широкое применение имели нанокремний [15–16], нанотитан [17], наножелезо [15, 16, 18], нанокарбонат [19–21], наноглины [8, 13], углеродные нановолокна [22] и некоторые другие.

При этом большинство авторов отмечало повышение прочностных показателей получаемых бетонов.

При анализе работ, посвященных применению наноразмерных добавок в цементные системы, всегда возникает вопрос о механизме их действия и об их рациональном количестве.

В некоторых работах приводятся результаты исследований с использованием нанодобавок в количестве 3,0–10,0% [15, 19, 21]. Объясняя улучшение свойств камня за счет уменьшения капиллярной пористости, авторы фактически говорят о микродобавках, которые выполняют указанную роль в бетонах. Нам кажется, что нанодобавки должны работать на этапе гидратации и структурообразования цементных суспензий, а количество добавок должно составлять десятые или сотые доли процента.

О влиянии нанодобавок на кинетику гидратации цементов говорилось в работах [23, 24], в которых они рассматривались как затравки для активации процесса гидратации цемента.

В работе [25] при изучении влияния различных нанодобавок на гидратацию цемента было показано, что многие из них ускоряют гидратацию цемента в 10–30 раз за счет снижения энергии активации приблизительно в 2–3 раза. При этом камень из модифицированного цемента, при одинаковой для всех концентрации (0,01%), через 28 суток твердения имел повышение прочности на 45–65% в зависимости от типа добавок. Применение в качестве наномодификатора SiO_2 обеспечило завершение процесса твердения в первые сутки благодаря родственному кристаллохимическому строению новообразований [25].

Об ускорении процесса гидратации вяжущих в присутствии добавок наноматериалов указывалось в работе [19]. В ней говорилось, что продукты гидратации цемента оседают на наночастицах благодаря их большой поверхностной энергии и растут. При этом образуется конгломерат, содержащий наночастицы в качестве «ядра». Чем раньше образуются такие ядра, тем раньше они могут вырасти до более крупных продуктов гидратации и ускорить гидратацию цемента. Благодаря высокой дисперсности наночастицы имеют очень большую удельную по-

верхность, обладают высокой реакционной способностью и могут выполнять роль центров кристаллизации.

В работе [19] для контроля кинетики гидратации был использован метод калориметрии, которая показала значительное ускорение гидратации портландцемента добавлением нанокарбоната кальция. При этом, по данным термогравиметрического анализа, количество $CaCO_3$ по мере гидратации уменьшалось, хотя методом РФА никаких новых продуктов не было обнаружено.

Процесс гидратации портландцемента состоит из двух противоположных процессов – растворения в дисперсной среде составляющих цемента и кристаллизации продуктов твердения из пересыщенного раствора [26, 27]. Образование и кристаллизация продуктов гидратации происходят самопроизвольно и обусловлены хаотичным движением молекул в растворе, а также возникновением «стесненных» условий [28, 29].

С учетом работ [28–30], возможный механизм действия нанодобавок на структурообразование цементных растворов представляется следующим.

Вероятность возникновения зародыша новой фазы описывается формулой Фольмера:

$$w_i = w_0 \exp\left(-\frac{A_i}{kT}\right), \quad (1)$$

где w_0 – предэкспоненциальный множитель; A_i – энергия образования зародыша новой фазы; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Для повышения вероятности возникновения новой фазы, при прочих равных условиях, необходимо уменьшить энергию образования зародышей в объеме. Она пропорциональна площади поверхности зародыша и удельной поверхностной энергии новообразования:

$$A_з = \frac{1}{3} S\sigma, \quad (2)$$

где S – площадь поверхности зародыша; σ – удельная поверхностная энергия новообразования.

Работа образования зародышей на подложке существенно меньше и равна $^1/_2$ периферийной энергии:

$$A_2 = \frac{1}{2} U æ \sim \frac{1}{2} \delta\sigma, \quad (3)$$

где U – периметр зародыша; δ – толщина мономолекулярного слоя; $æ \sim \delta\sigma$ – удельная краевая энергия.

Меньшая энергия образования зародышей на границе раздела фаз повышает вероятность их образования на подложке по сравнению с их образованием в объеме раствора.

Размер устойчивого зародыша новой фазы определяется уравнением Томсона-Кельвина:

$$r_{кр} = \frac{2M\sigma}{RT\ln\alpha}, \quad (4)$$

где $r_{кр}$ – устойчивый критический размер зародыша; M – молярная масса; σ – поверхностное натяжение на поверхности раздела фаз; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; α – степень перенасыщения раствора.

Для образования и дальнейшего существования зародышей меньшего размера на «подложке» необходимо уменьшить межфазную энергию между ними. Она будет минимальна при большой поверхности границ раздела и ее энергетической ненасыщенности, а также при идентичности по кристаллохимическим характеристикам материала, создающего эти границы выделяющейся фазе [30].

По Полаку А.Ф. [29] мерой кристаллохимической конгруэнтности между подложкой и новой фазой является коэффициент физико-химической неоднородности:

$$x = \frac{\sigma_2 + \sigma_{1-2} - \sigma_1}{\sigma_2}. \quad (5)$$

Если подложка и новообразование полностью конгруэнтны, т. е. $\sigma_1 = \sigma_2$, тогда $\sigma_{1-2} = 0$, следовательно $x = 0$. Если же между ними не возникает никаких связей, тогда межфазная энергия определяется суммой межфазных энергий подложки и новой фазой в области контакта, т. е. $\sigma_{1-2} = \sigma_1 + \sigma_2$, а $x = 2$. Работа образования зародышей напрямую зависит от коэффициента физико-химической неоднородности ($A \sim x$). Поэтому даже несущественное уменьшение энергоемкости процесса приводит к увеличению вероятности возникновения зародыша новой фазы в десятки и сотни тысяч раз [29].

При наборе прочности структуры цементной суспензии первоначально происходит образование коагуляционной структуры с последующим срастанием кристаллогидратов и образованием структуры из гидросиликатов кальция [26].

Добавление в эту систему нанопорошков позволяет увеличить количество «подложек» (центров кристаллизации) за счет появления родственных по строению и составу частиц. Этот механизм наблюдается в первые часы твердения – от 8 до 24 часов.

Превышение концентрации нанодобавок в портдандцементе может привести к обратному эффекту – замедлению скорости твердения и снижению прочностных характеристик. Это связно с тем, что наночастицы, имея высокую удельную поверхность и химическую активность, связывают воду, образуя малорастворимые кристаллогидраты, уменьшая количество воды для гидратации цемента [31].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При выполнении работы применялись методики измерения в соответствии с ISO-10426-2-2003. В частности, это касалось измерений реологии растворов и прочности на сжатие.

Реологические характеристики замерялись при 24, 30 и 60°С на вискозиметре Fann модели 35SA-SR12. Измерения на ультразвуковом анализаторе прочности Fann 420ATC проводились при аналогичных температурных условиях и давлении, равном 3000 psi.

Измерение прочности структуры раствора и камня на сжатие проводилось на ультразвуковом анализаторе прочности Fann 420 ATC.

Исследования проводились на портландцементе ПЦТ-1-G-CC-1 производства ООО «Дюкерхофф» с добавлением нанопорошков карбоната кальция и железа. Размер частиц нанопорошка карбоната кальция составлял 60–80 нм, содержание $CaCO_3$ ⩾ 98%. Размер частиц нанопорошка железа – 50–110 нм, содержание Fe ⩾ 99,8%, концентрация добавок – 0,01% от массы сухого цемента.

Выбор данных порошков обусловлен вероятной возможностью их участия в процессе гидратации как инициаторов твердения. Также эти добавки могут служить подложкой для образования зародышей новой фазы [28, 29].

Водоцементное отношение растворов было 0,45. Плотность цементных растворов составила 1,87 г/см^3. В раствор также был добавлен ПАВ и пеногаситель в количестве 0,01 % от массы сухого цемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. При добавлении нанокарбоната кальция наблюдалось незначительное увеличение реологических параметров. При добавлении наножелеза параметры были практически идентичны при различных температурных режимах (табл. 1)

Таблица 1
Реологические характеристики цементных растворов

№	Добавка	Температура	PV, мПа*с	ДНС, Па	СНС 10 с / 10 мин, Па
1	Без добавок	24	18	15,3	7/12
		30	36	11,5	6/7
		60	24	22	7/9
2	Нанокарбонат 0,01 %	24	29,3	11	7/10
		30	27,8	13,9	6/10
		60	27,8	23,9	7/18
3	Наножелезо 0,01 %	24	27,8	10,5	8/47
		30	29,3	12,5	5/7
		60	31,5	15,3	7/9

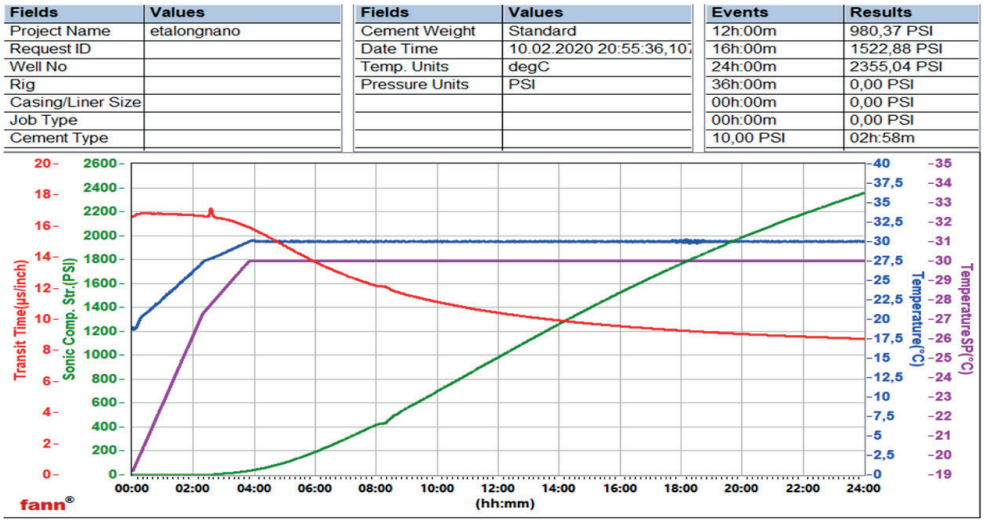

Рис. 1. **Изменение прочности на сжатие камня из бездобавочного портландцемента при 30°С**

Графики изменения прочности камня, полученные на ультразвуковом анализаторе прочности, приведены на рис. 1–6 и в табл. 2.

В табл. 3 приведено относительное изменение прочности цементного камня с нанодобавками относительно бездобавочного цемента.

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	nanoca001	Cement Weight	Standard	12h:00m	553,72 PSI
Request ID		Date Time	01.02.2020 18:47:06,225	16h:00m	907,02 PSI
Well No		Temp. Units	degC	24h:00m	1569,53 PSI
Rig		Pressure Units	PSI	36h:00m	0,00 PSI
Casing/Liner Size				00h:00m	0,00 PSI
Job Type				00h:00m	0,00 PSI
Cement Type				10,00 PSI	03h:30m

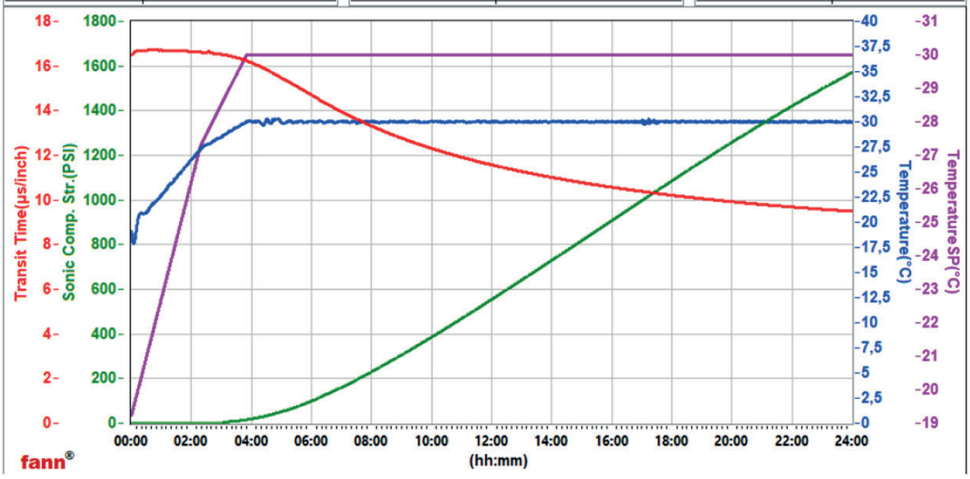

Рис. 2. **Изменение прочности на сжатие камня из портландцемента с 0,01 % нанопорошка карбоната кальция при 30°С**

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	nanofe001	Cement Weight	Standard	12h:00m	1012,56 PSI
Request ID		Date Time	08.02.2020 16:40:13,316	16h:00m	1581,19 PSI
Well No		Temp. Units	degC	24h:00m	2440,82 PSI
Rig		Pressure Units	PSI	36h:00m	0,00 PSI
Casing/Liner Size				50,00 PSI	04h:12m
Job Type				500,00 PSI	08h:30m
Cement Type				1000,00 PSI	11h:54m

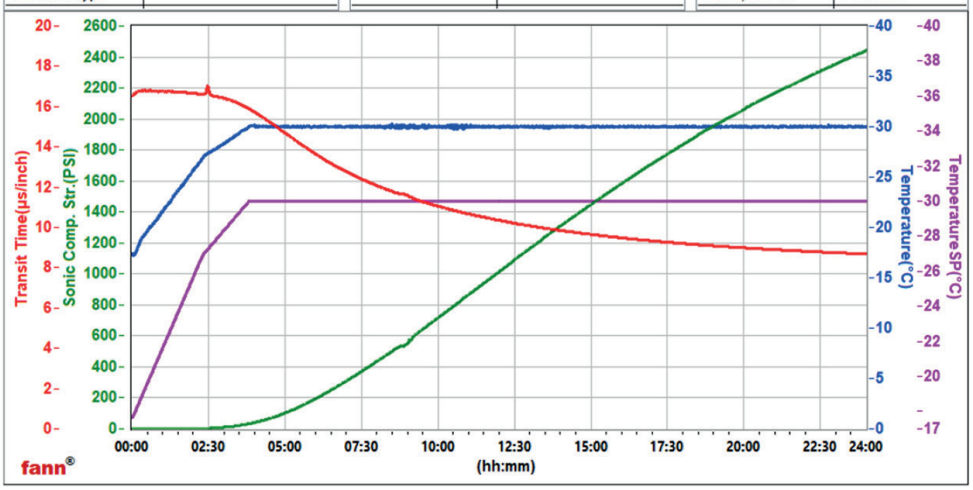

Рис. 3. **Изменение прочности на сжатие камня из портландцемента с 0,01 % нанопорошка железа при 30°С**

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	etalongnano60gr	Cement Weight	Standard	12h:00m	2567,40 PSI
Request ID		Date Time	13.02.2020 20:59:04,71	16h:00m	2958,12 PSI
Well No		Temp. Units	degC	24h:00m	3437,98 PSI
Rig		Pressure Units	PSI	36h:00m	0,00 PSI
Casing/Liner Size				00h:00m	0,00 PSI
Job Type				00h:00m	0,00 PSI
Cement Type				10,00 PSI	01h:47m

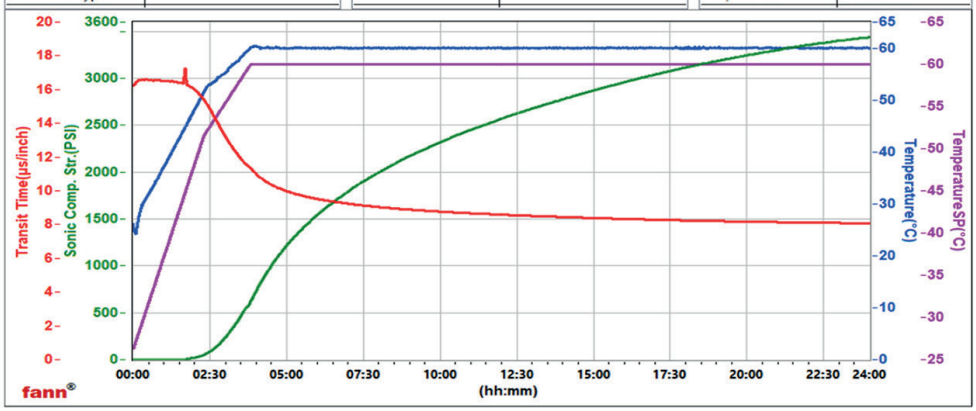

Рис. 4. **Изменение прочности на сжатие камня из бездобавочного портландцемента при 60°С**

Fields	Values	Fields	Values	Events	Results
Project Name	nanoca001_60gr	Cement Weight	Standard	12h:00m	3181,06 PSI
Request ID		Date Time	02.02.2020 20:37:41,86	16h:00m	3609,46 PSI
Well No		Temp. Units	degC	24h:00m	4100,79 PSI
Rig		Pressure Units	PSI	36h:00m	0,00 PSI
Casing/Liner Size				00h:00m	0,00 PSI
Job Type				00h:00m	0,00 PSI
Cement Type				10,00 PSI	01h:15m

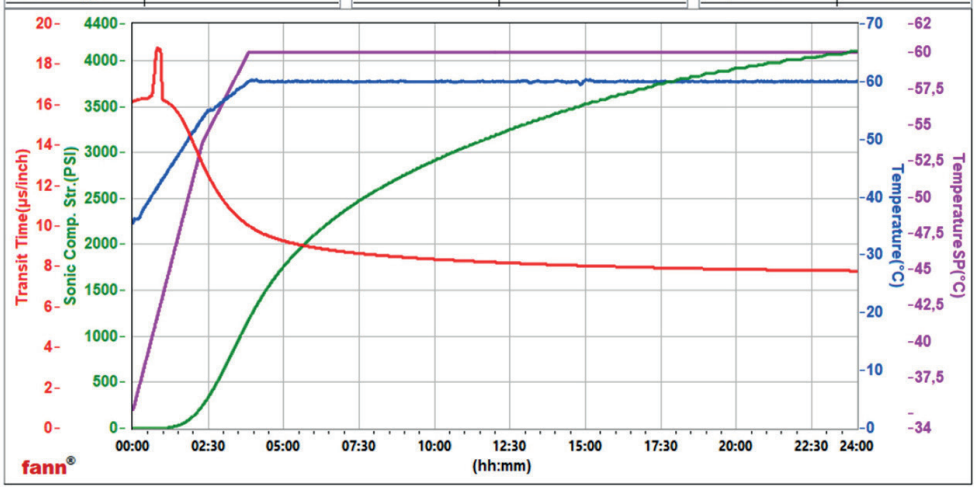

Рис. 5. **Изменение прочности на сжатие камня из портландцемента с 0,01 % нанопорошка карбоната кальция при 60°С**

Fields	Values
Project Name	nanofe001_60gr
Request ID	
Well No	
Rig	
Casing/Liner Size	
Job Type	
Cement Type	

Fields	Values
Cement Weight	Standard
Date Time	09.02.2020 18:24:36,106
Temp. Units	degC
Pressure Units	PSI

Events	Results
12h:00m	2651,51 PSI
16h:00m	3026,36 PSI
24h:00m	3475,63 PSI
00h:05m	3475,63 PSI
05h:00m	3475,69 PSI
29h:00m	0,00 PSI
10,00 PSI	01h:47m

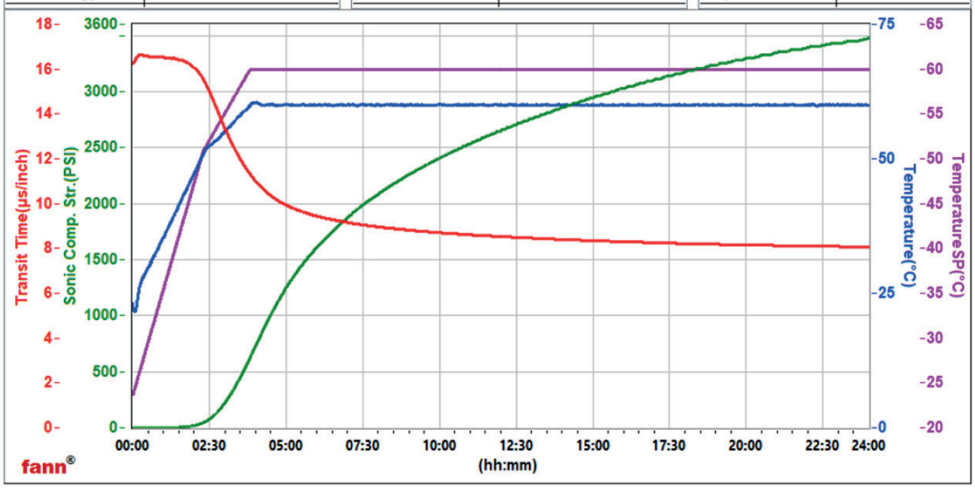

Рис. 6. **Изменение прочности на сжатие камня из портландцемента с 0,01 % нанопорошка железа при 60°С**

Таблица 2
Прочность цементного камня с нанодобавками

№	Добавка	Т, °С	Предел прочности, МПа через, час		
			12 час	16 час	24 час
1	Без добавок	30	6,76	10,5	16,24
		60	17,7	20,4	23,7
2	Нанокарбонат 0,01 %	30	3,82	6,25	10,82
		60	21,93	24,89	28,28
3	Наножелезо 0,01 %	30	6,98	10,9	16,83
			18,28	20,87	23,97

Таблица 3
Относительное изменение прочности цементного камня

№	Добавка	Т, °С	Изменение прочности цементного камня через		
			12 час	16 час	24 час
1	Нанокарбонат 0,01%	30	–43,5	–40,4	–33,3
		60	23,9	22,0	19,3
2	Наножелезо 0,01%	30	3,3	3,8	3,64
		60	3,3	2,3	1,1

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По реологическим исследованиям, наблюдается рост пластической вязкости с увеличением температуры, при этом уменьшается ДНС.

Добавление нанокарбоната кальция в количестве 0,01% отрицательно сказалось на приросте прочности на сжатие при 30°С (–33,35% спустя 24 часа), однако при увеличении температуры до 60°С прирост прочности – положительный (+19,28% спу-

стя 24 часа). Подобные результаты наблюдались и у других исследователей. Возможная причина – образование гидрокарбоалюмината кальция, негативно сказавшегося на прочности в начальный период твердения.

Добавление нанопорошка железа в количестве 0,01%, наоборот, показывает небольшой положительный прирост прочности как при 30, так и при 60°С (за 24 часа 3,64% и 1,1% соответственно).

ВЫВОДЫ

1. Целесообразно проведение экспериментов для оптимизации концентрации нанодобавок в цемент.

2. Для уточнения седиментационной устойчивости раствора необходимо провести тестирование после выявления оптимальной концентрации нанодобавок, показывающей наибольший прирост прочности на сжатие.

3. Изменение реологических свойств тампонажных растворов, модифицированных нанодобавками, по сравнению с эталонным раствором незначительно.

4. Динамика изменения прочности цементного раствора при добавлении нанопорошка железа при 30 и 60°С незначительна. Следовательно, данная добавка не участвует в процессе гидратации и может только влиять на уменьшение пористости цементного камня, заполняя пустоты в кристаллической решетке, делая ее более равномерной и плотной.

5. Отрицательный прирост прочности цементного камня с добавлением нанопорошка карбоната кальция при 30°С объясняется недостаточной энергией для активации. При 60°С динамика является положительной, что свидетельствует о том, что увеличение температуры повышает вероятность возникновения зародыша новой фазы, а также образование зародышей происходит на «подложках», сродственных продуктам гидратации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Булатов А.И. Детективная биография герметичности крепи скважин. Краснодар: Просвещение-Юг, 2008. 767 с.

2. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов. М.: Недра, 1978. 293 с.

3. Agzamov FA, Kabdushev AA, Komleva SF, Bayutenov NA. Use of cement sludges with reduced fluid losses for cementing wells in Kazakhstan. *Pollution Research*. 2016; 35(4): 891–896.

4. Агзамов Ф.А., Исмагилова Э.Р. Самозалечивающиеся цементы – ключ к сохранению герметичности крепи скважин. Часть 1 // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Том 11, № 5. С. 394–402. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019- 11-5-394-402.

5. Бекбаев А.А., Агзамов Ф.А. Дисперсное армирование как фактор повышения качества облегченных цементных растворов. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 8. С. 38–42.

6. Yusifzadeh HQ, Edwards EJ, Shahbazov Jr, Kaziov AA. *Technologies of Oil and Gas Well Drilling*. Baku: 2014.

7. Сулейманов Б.А., Велиев Э.Ф. О влиянии гранулометрического состава и наноразмерных добавок на качество изоляции затрубного пространства в процессе цементирования скважин // SOCAR Proceedings. 2016. № 4. С. 4–10. https://doi.org/10.5510/OGP20160400293.

8. Murtaza M, Rahman M, Al-Majed A. Effect of nanoclays on mechanical and rheological properties of cement sludge of oil wells in HPHT environment. *International Conference on Petroleum Technologies*. 2016. Available from: https://doi.org/10.2523/IPTC-18989-MS.

9. De la Roij R. Egyed C, Lips JP. Nano-engineered oil wells cement improves flexibility and increases compressive strength: a laboratory study. *Society of Petroleum Engineers*. 2012. Available from: https://doi.org/10.2118/156501-MS.

10. Кравченко И.В., Кузнецова Т.В., Власова Н.Г., Юдович Б.Э. Химия и технология специальных цементов. М.: Стройиздат, 1979. 207 с.

11. Ridha S, Yerikania U. New nano-geopolymer cement system improves wellbore integrity upon acidizing job: experimental results. *Society of Petroleum Engineers*. 2015. Available from: https://doi.org/10.2118/176419-MS.

12. Sanchez F, Sobolev K. Nanotechnologies in concrete. A review. *Construction and construction materials*. 2010;24(11): 2060–2071. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014.

13. Muhd Norhasri MS, Hamidah MS, Mohd Fadzil A. Applications of using nanomaterial in concrete: A review. *Construction and building materials*. 2017;133: 91–97. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005.

14. *Nanotechnology in cement-based construction*. Edited by Antonella D'A, Annibale LM, Filippo U. Imprint by Jenny Stanford Publishing. Available from: https://doi.org/10.1201/9780429328497.

15. Oltulu M, Sahin R. Single and combined effects of nano-SiO_2, nano-Al_2O_3 and nano-Fe_2O_3 powders on the compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume. *Materials Science and Engineering*. 2011;528(22–23): 7012–7019. Available from: https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.054.

16. Hui Li, Hui-gang Xiao, Jie Yuan, Jinping Ou. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*. 2004; 35 (2):185–189. Available from: https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0.

17. Jalal M, Fathi M, Farzad M. Effected of fly ash and TiO_2 nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high-strength self-compacting concrete. *Mechanics of materials*. 2013;61: 11–27. Available from: https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.01.010.

18. Shiho Kawashima, Pengkun Hou, David J.Corr, Shah SP. Modification of cement-based materials with nanoparticles. *Cement and concrete composites*. 2013;36: 8–15. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.012.

19. Xiaoyan Liu, Lei Chen, Aihua Liu, Xinrui Wang. Influence of Nano-$CaCO_3$ on the properties of cement paste. *Energy Process*. 2012; 16(B): 991–996. Available from: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.158.

20. Sato T, Diallo F. Seeding effect of nano-$CaCO_3$ on the hydration of tricalcium silicate. *Journal of the Transportation Research Board*. 2010; (2141): 61–67. Available from: https://doi.org/10.3141/2141-11.

21. Sato T, Beaudoin JJ. Effect of nano-$CaCO_3$ on the hydration of cement-containing additional cementing materials. *Advances in Cement Research*. 2011; 23(1): 33–43. Available from: https://doi.org/10.1680/adcr.9.00016.

22. Metaxa Z, Konsta-Gdoutos M, Shah SP. Mechanical properties and nanostructure of cement-based materials reinforced with carbon nanofibers and polyvinyl alcohol (PVA) microfibers. Materials Science. *Polymer Journal*. 2010. Available from: https://doi.org/10.14359/51663743.

23. Gerrit L, Dietmar S. Control cement hydration with nanoparticles. *Cement and concrete composites*. 2015;57: 64–67. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.003.

24. Artioli G, Ferrari G, Dalkoni MC, Valentini L. Nanosemines as modifiersof the cement hydration kinetics. *Materials Science*. 2020. Available from: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00010-6.

25. Леденев В.В., Ярцев В.П., Струлев С.А., Однолько В.Г. Влияние наномодификации на прочность и подвижность цементных бетонов и разработка пенобетона // Вопросы современной науки и практики. 2012. № 37 (1). С. 24–29.

26. Тейлор Х. Химия цементов. М.: Стройиздат, 1969. 500 с.

27. Мчедлов-Петросян О.П. Современные взгляды на процессы твердения цементов // Новое в технологии и технике производства цемента. Труды института Южгипроцемет. М.: Госстройиздат, 1963. С. 144–152.

28. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1973. 203 с.

29. Полак А.Ф., Физико-химические основы коррозии железобетон // Элементарные процессы коррозии: учеб. Пособие. Уфа: Изд. Уфимск. нефт. ин-та, 1982. 76 с.

30. Кузнецова Т.В. Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов: учебник для хим.-технол. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1989. 384 с.

31. Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Наномодифицирование цементных композитов на технологической стадии жизненного цикла // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Том 12, № 3. С. 130–139. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агзамов Фарит Акрамович – доктор технических наук, профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, faritag@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5850-5261

Григорьев Александр Юрьевич – аспирант кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, alexgrigu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5247-1216

ВКЛАД АВТОРОВ

Агзамов Ф.А. – выявление зависимостей, написание статьи, научное редактирование текста.

Григорьев А.Ю. – подготовка образцов, проведение экспериментов, выявление зависимостей.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.06.2022; одобрена после рецензирования 27.06.2022; принята к публикации 04.07.2022.

Original article
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-328-338

CC BY 4.0

Three-Arch, Three-Cable Face Steel-Sided Rigid Tie Composite Arch Bridge

Xiangyu Li[2], Luojin Cao[3], Cheng Zhang[3], Liping Ma[1], Yong Li[1,*]

[1] College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China
[2] Shenzhen College of international Education, Shenzhen, Guangdong 518110, China
[3] Shenzhen Bridge Design and Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518043, China

* Corresponding author: e-mail: Liy2000@163.com

ABSTRACT: This essay proposes a new structural system for a large span three-arch, three-cable face steel edge main beamrigid tie composite arch bridge. The authors invented a new structural form of a steel edge main girder rigid tie, and developed and designed a key arch-bar three-dimensional six-way space node structure. The analysis of results show that: compared with the traditional arch bridge, the large span three-arch three-cable face steel-sided main beam rigid ties composite arch bridgeis beautiful in shape, hasareasonable structure and efficient construction. It is a high-strength, high-performance composite structural system, with better strength, stiffness, stability and dynamic performance, which overcomes the large span ultra-wide bridge deck arch bridge horizontal thrust, poor transverse stability, and the key technical problems of acable joint control. The proposed structural form has a wide range of engineering application prospects.

KEY WORDS: Arch Bridge; Composite structure; Reasonable axis of arch; Steel edge main beam; Rigid ties; High-performance structural system.

FOR CITATION: Xiangyu Li, Luojin Cao, Cheng Zhang, Liping Ma, Yong Li. Three-Arch, Three-Cable Face Steel-Sided Main Girder Rigid Tie Composite Arch Bridge. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(4): 328–338. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-328-338. – EDN: JVKBSO.

OUTLINE

As the oldest bridge type of mankind, the arch bridge has been one of the bridge types of choice for large span bridges for more than three thousand years [1].

With the development of the times, especially the progress in the field of material science, arch bridges have derived a variety of structural forms. From the material, mainly including stone arch bridge, concrete arch bridge, steel arch bridge and steel-concrete combination arch bridge. From the structural form, mainly including the upper-bearing, middle-bearing, lower-bearing arch bridge. From the arch axis form, mainly including circular curve, parabolic, suspension chain line arch bridge [2]. Steel-concrete composite structure arch bridge consists of several different mechanical properties of materials, mainly steel, concrete, high-strength steel wire, which under the action of constant load, live load common stress, coordinated deformation, both to improve the ultimate bearing capacity of the hoop concrete, while improving the flexural stability of the steel structure and structural durability, give full play to the respective advantages of different mechanical properties of materials, the forma-

Fig. 1. **Full steel-concretecomposite bridge structure system**
(Fengwan bridge on national highway 321,
L = 80+150+80 m, W = 61 m)

© Xiangyu Li, Luojin Cao, Cheng Zhang, Liping Ma, Yong Li, 2022

tion of a new high-strength high-performance composite bridge structure system [3, 4, 5, 6] (Fig. 1).

1. STRUCTURE DESIGN

In this essay, we propose a large-span three-arch, three-cable surface steel edge main beam rigid tie composite arch bridge structural system (Fig. 2), invented a new structural form of steel edge main beam rigid tie, and developed and designed an arch-bar three-dimensional six-way space node key structure (Fig. 3). For the traditional concrete arch bridge self-weight is too large, large span steel structure arch bridge cost and other problems [7], to solve the large span ultra-wide bridge deck arch bridge horizontal thrust, transverse stability is poor, adjust the cable joint control difficult and other key technical problems. The following will analyse and discuss from several aspects such as structural design, construction method and stability analysis.

1.1. Overall Design

The new structure system of three-arch, three-cable surface rigid tied arch bridge, i.e., the bridge type adopts down-bearing steel box-concrete composite tied arch bridge, the bridge deck adopts high performance pressed steel plate steel-concrete composite structure, and the bridge pier adopts steel tube restrained concrete composite structure. The main bridge adopts 80+150+80 m three-span under-bearing steel box arch bridge, the main span is 150 m, the side span is 80 m, the bridge width is 60 m, the sagittal span ratio is 1/4.5, the arch axis adopts suspension chain line plus parabola to form a convergent composite curve, the arch axis coefficient is 1.988, the pre-arch is set to L/600, set according to the secondary parabola. There are 3 vertical vertical arch ribs in the cross-bridge direction, the spacing is 24 m, and the cross-sectional form of arch ribs is steel box. The main arch section is 3 m high, the arch ribs are 3 m wide on both sides of the bridge and 4 m in the middle; the side arch section is 2.25 m high, the arch ribs are 3 m on both sides of the bridge and 4 m in the middle; the foot section of the arch is filled with C50 micro expansion concrete.

The bridge adopts Chinese first-class highway standard, the design speed is 80 km/h; the load level is city-A+ highway grade I; the bridge adopts two-way 12 lanes, the main lane is 8 lanes, the auxiliary lane is 4 lanes; the maximum longitudinal slope of the bridge deck is 3.5%; the cross slope of the bridge deck is 2%; the highest navigable water level under the bridge is 9.816 (bead base 9.0 m), the navigable clearance is not less than 6m; the peak acceleration value of ground vibration is 0.05 g. VII degree fortification; design reference period of 100 years.

1.2. Main Arch Design

1.2.1. Main Arch Section

The arch ribs are equal-section steel boxes. The arch rib sections are divided into four forms: main span middle arch, side span middle arch, main span side arch, and side

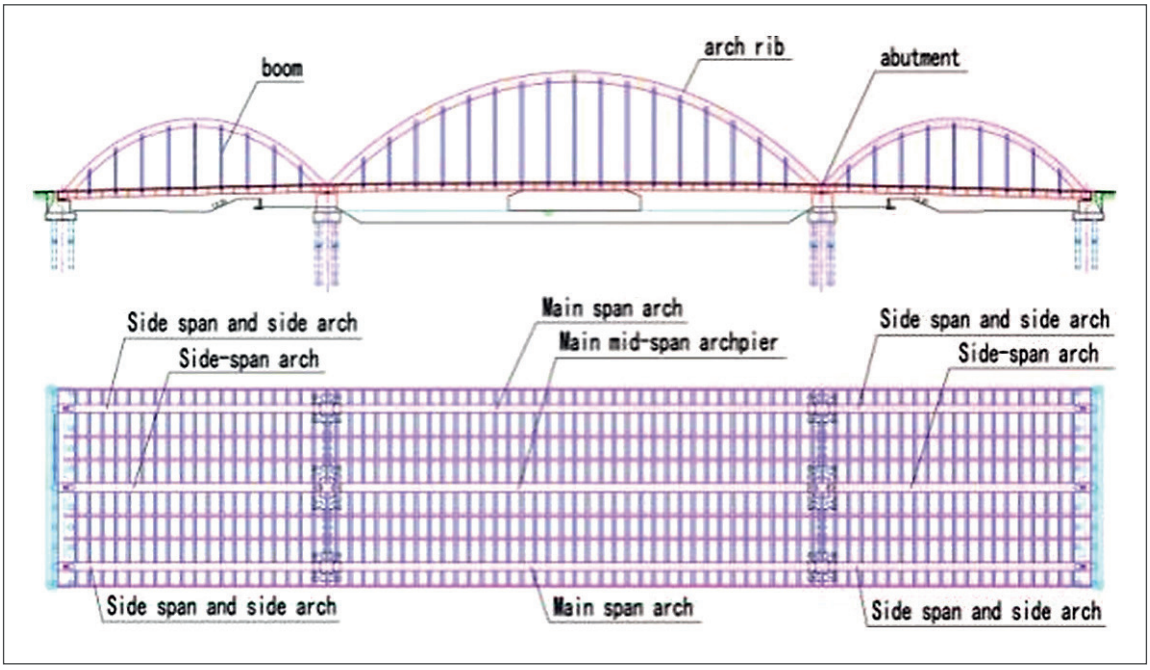

Fig. 2. **Three-arch, three-cable face side main girder rigid tie composite arch bridge structure**

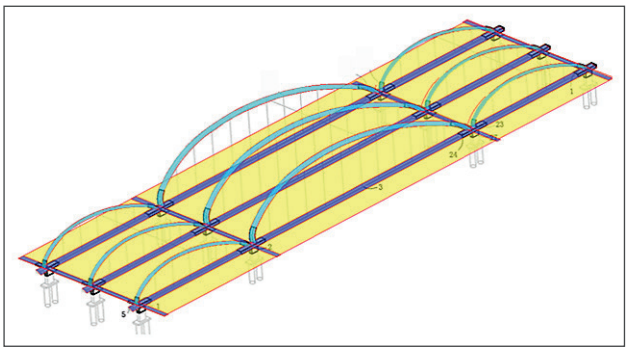

Fig. 3. **Arch-rod three-dimensional six-way space key node construction**

span side arch. C50 micro-expansion concrete is filled in each arch foot section to form a composite steel-concrete section form (Fig. 4), which has greater bending and torsional stiffness.

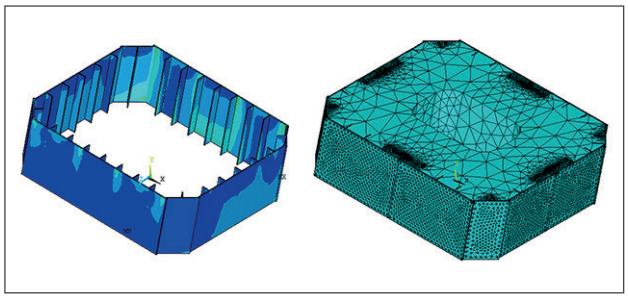

Fig. 4. **Combined section form of arch foot section**

Main span middle arch: section height 3 m; width 3 m, steel plate thickness 30 mm; divided into 9 sections, foot section is filled with C50 micro expansion concrete.

Main span side arch: section height 3 m; width 2.5 m, thickness of steel plate is 24 mm; divided into 9 sections, foot section is filled with C50 micro expansion concrete.

Side span main arch: section height 2.5 m; width 3 m, thickness of steel plate is 20 mm; divided into 7 sections, foot section is filled with C50 slightly expanded concrete.

Side span side arch: section height 2.5 m; width 2.5 m, steel plate thickness 16mm; divided into 7 sections, the foot section is filled with C50 micro expansion concrete.

1.2.2. Composite Arch Axis Line Equation

Arch axes commonly used in arch bridges are circular arc, parabolic and suspension chain lines [8]. The circular arc line is simple, convenient construction, but deviates from the pressure line, so that the main arch sections are not uniform, commonly used in small span arch bridge; parabolic line and suspension chain line is closer to the constant load pressure line. Suspension chain line is currently the most common arch axis type used in large and medium span arch bridges. The vertical coordinate on the arch axis is proportional to the moment value of the simply supported beam under the same load of the same span, so that the arch cross-section is only subject to axial force and no bending moment, and the arch axis that meets this condition is called reasonable arch axis [9, 10].

The arch has a uniformly distributed vertical load along the arch axis (such as self-weight), the bridge reasonable arch axis derivation process is as follows.

When the arch axis changes, the load also changes.p(x) is the self-weight per unit length along the arch axis, and the load set along the horizontal direction is q(x).

From the resulting, substitute the following equation.

Since it is specified that y is positive upward, x is positive to the right, and q is positive downward, the right side of the above equation has a positive sign.

After integration, we get:

If p(x) = constant = p, then

that is

Since when x = 0, the constant A = 0, that is

Integrating once more, we get

Since when x = 0, y = 0, so

Finally, we get

The arch is under the action of self-weight load, and the reasonable arch axis is the suspension chain line.

Considering the influence of horizontal thrust, in order to reduce the arch's own horizontal thrust and save the horizontal ties, the arch foot adopts convergent design. Due to the change of the angle of the supporting surface of the arch foot, under the action of general load, in order to seek the corresponding reasonable arch axis of the arch foot section, it can be assumed that the arch is in the state of no bending moment, but the arch is under the action of uniform static pressure, and its reasonable arch axis is circular curve. According to the load q(s), the radius of the circular curve can be determined.

According to the above formula, the arch axis adopts the suspension chain line and circular curve arch foot together to form the convergent composite arch axis, and the two curves meet the continuous and conductible conditions at the transition point, and the arch axis coefficient m is 1.988.

1.2.3. Transverse Coupling System

There are 5 wind braces for the main span arch rib, the cross braces are steel box section, 2 m wide and 2 m high; the thickness of top, bottom and web are 20 mm; there is no transverse wind brace for the side span arch rib.

1.2.4. Boom

The boom adopts galvanized high-strength low-relaxation prestressing steel wire with three cable faces, and the main bridge arch rib has 210 booms in total, using longi-

tudinal double booms. Longitudinal bridge boom spacing 8m, double boom spacing 0.6 m, horizontal spacing 24 m.

The steel cables of the boom are made of extruded double-layered large pitch twisted stranded cables, with 73 Φ7 mm galvanized high-strength low relaxation prestressing steel wires for each boom bundle of the main span side arch and side arch; 91 Φ7 mm galvanized high-strength low relaxation prestressing steel wires for each boom bundle of the main span middle arch and side arch; the standard strength is fpk = 1670 Mpa. High-density polyethylene (PE sheathing) double sheathing protection.

1.3. Main Beam Design

1.3.1. Steel Edge Main Beam Rigid Ties

There are 4 types of longitudinal girders: (1) 1 longitudinal main beam with steel box structure, height 1.95 m, width 3.0 m, thickness of top and bottom plates and webs are changed from 32 mm of main span to 20 mm of side span; (2) 2 longitudinal side beams with steel box structure, height 1.66 m, width 2.5 m, thickness of top and bottom plates and webs are changed from 32 mm of main span to 20 mm of side span. (3) Two I-beams (4 transverse) are installed between the main longitudinal beam and the side longitudinal beam, with a height of 1.75 m ~ 1.86 m. The main span is 0.6 m wide, with a top and bottom plate thickness of 20 mm and a web thickness of 16 mm; the side span is 0.4 m wide, with a top and bottom plate thickness of 16 mm and a web thickness of 12 mm. The secondary longitudinal beam is disconnected at the position where the crossbeam is met.

The steel side main girders are rigid ties, instead of flexible horizontal ties, through three groups of side main girders and many cross girders to form a rigid frame, and concrete to form a combined section, with the advantages of large bridge deck stiffness, good overall performance [11].

1.3.2. Steel Crossbeam

There are 3 types of full bridge crossbeams: (1) pivot crossbeam, steel box structure crossbeam is set at the bearing position, beam height 1.66 ~ 1.95 m, width 3.0 m, top and bottom plate thickness 30 mm, web thickness 30 mm, pivot crossbeam is disconnected at the main and side longitudinal beam position. (2) Common crossbeam with I-beam structure, beam height 1.66 ~ 1.95 m, width 0.6 m, top and bottom plate thickness 24 mm, web thickness 20 mm, common crossbeam is disconnected at the position of main and side longitudinal beams. (3) Cantilever crossbeam with I-beam structure, beam height 0.516 m ~ 1.016 m, top plate width 0.4 m, bottom plate width 0.2 m; top and bottom plate thickness 16 mm, web thickness 12 mm.

The rigid tie bar of the steel side main beam, instead of the flexible horizontal tie bar, forms a rigid frame through three groups of side main beams and many beams, and forms a composite section with concrete. It has the advantages of large rigidity of the bridge deck and good overall performance [11].

1.3.3. Composite Structure Bridge Deck System

Three groups of steel side girders and many steel crossbeams form a rigid frame, in the rigid frame cavity parts arranged 100 mm high stiffening ribs of 10 mm thin steel plate, stiffening ribs open 50 mm round hole, spacing 100 mm, across the bridge deck reinforcement, forming a PBL shear key with holes, and the bridge deck reinforced concrete together to form a steel-concrete combination deck system, the overall performance of the bridge deck, stiffness, good seismic ductility and structural durability.

2. CALCULATION AND ANALYSIS

2.1. Finite Element Model

Midas/Civil and ANSYS large finite element software were used to build the full bridge finite element model and the local finite element model respectively. The Midas/Civil finite element model for the full bridge calculation and analysis has a total of 3472 units (210 truss units, 9 tensile-only units and 3253 beam units) and 2693 nodes in total. The base bottom surface is solidified, and the top of the base and pier cap, arch foot and horizontal ties, and arch foot and cap beam all adopt rigid connection in elastic connection [12, 13]. The spatial finite element model is shown in Fig. 5.

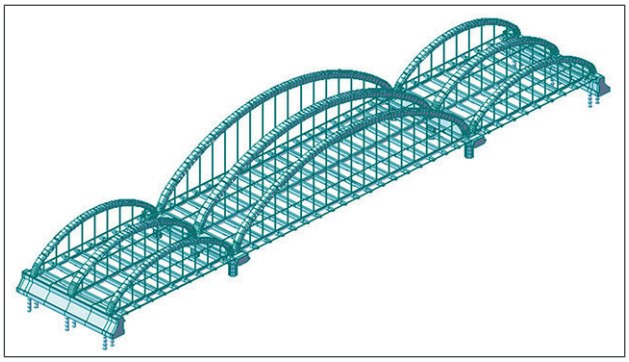

Fig. 5. **Composite Nielsen arch bridge finite element model**

2.2. Calculated load and boundary conditions

Design load: city-A, highway I; live load is loaded according to two-way 12-lane space, transverse reduction factor 0.5, longitudinal reduction factor 0.97, crowd load

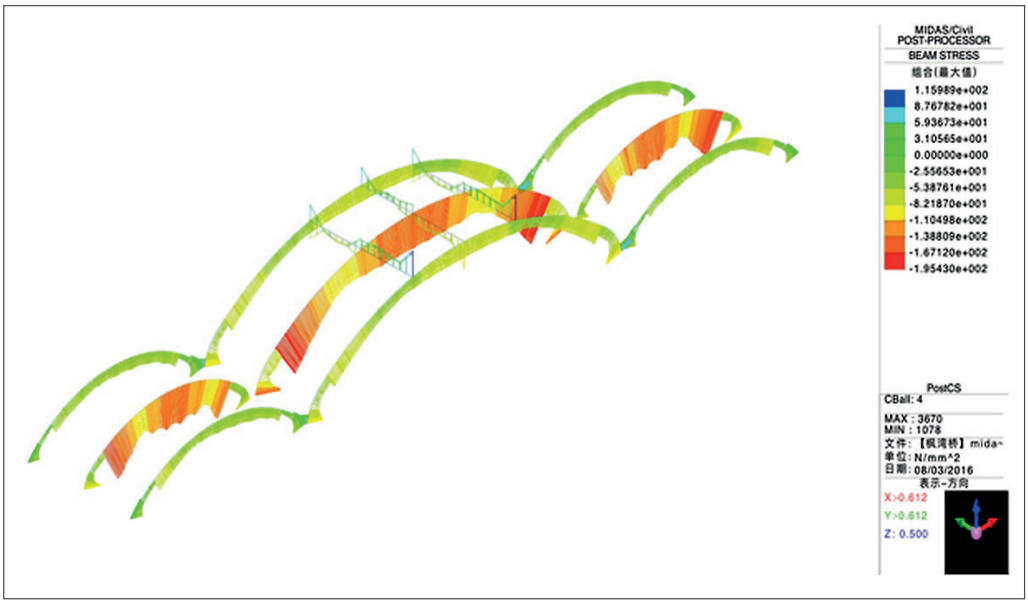

Fig. 6. **The most unfavourable combination of action stress diagram**

is loaded according to 3.5 kPa/m². The overall temperature load is considered as 25 degrees of warming and 25 degrees of cooling, and the temperature difference between the diagonal cable and the main beam is ±10 degrees.

We consider mainly 5 kinds of load combinations, combination I: constant load + crowd load + lane load + uneven settlement; combination II: constant load + crowd load + lane load + temperature combination + live load cross wind + uneven settlement; combination III: constant load + crowd load + lane load + temperature combination + live load downwind + uneven settlement; combination IV: constant load + cross wind + uneven settlement; combination V: constant load + downwind + uneven settlement.

2.3. Static force analysis

According to the results of finite element analysis, the internal force and bearing capacity of steel mixed arch rib section and steel arch rib section are calculated, and the results of this calculation take two pieces of arch ribs in the hole of this most unfavourable position, the most unfavourable combination as shown in Fig. 6: self-weight + second phase + boom + bollard + vehicle + warming + transverse wind load, the maximum value of 115.9MPa; the minimum value −194.3 MPa, to meet the specification requirements.

In order to verify whether the steel pipe filled with concrete is more beneficial to the structure, the concrete inside the steel pipe is removed to verify the strength index by comparison, and according to the calculation results (Fig. 7), the structural stress level decreases significantly after the steel pipe is filled with concrete.

2.4. Arch Footing Partial Verification

ANSYS finite element analysis software was used to establish the local spatial solid models of the longitudinal

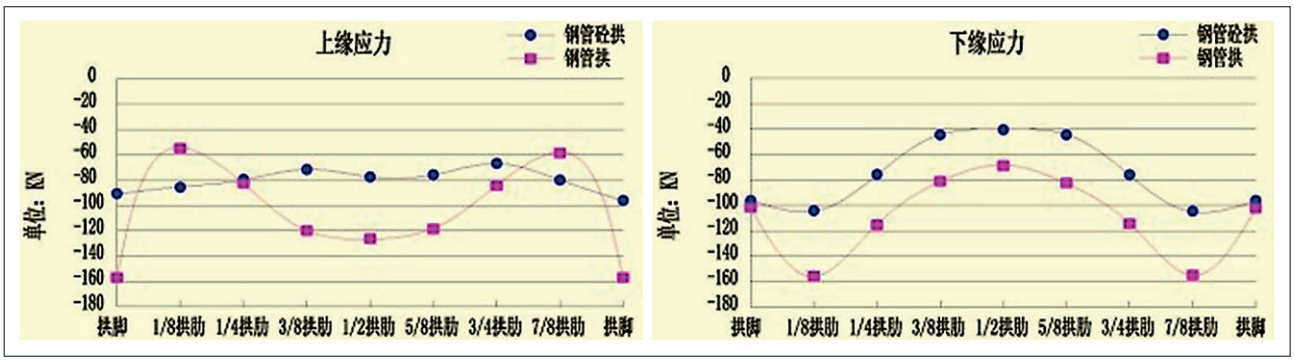

Fig. 7. **Comparison of steel stresses in combined section of steel pipe concrete arch**

beam, the most unfavourable section at the opening of the arch ribs and the foot of the arch in the bridge state. The boundary conditions of the main beam are loaded with the actual displacement and the actual internal force calculated by Midas Civil, and the solid 92 unit is used to simulate the steel structure, the solid 65 unit to simulate the core concrete of the arch footing, the link 180 unit to simulate the boom, and the beam web and the flat link are simulated by the beam188 unit [14].

2.4.1. Stress Test at Arch Rib Openings

The local model of arch rib is taken into bridge state boom maximum tension position section, length 4 m. The local model of arch rib is divided into 233,788 units, 459,614 nodes, finite element model as shown in Fig. 8, stress analysis results as shown in Table 1.

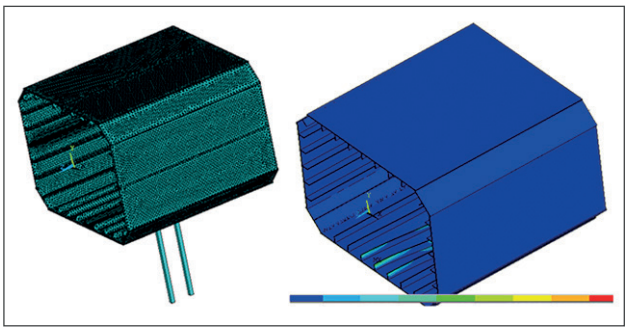

Fig. 8. **Local finite element model of steel arch rib section**

2.4.2. Calculation of Stress at the Anchorage of Arch Foot

The local model of the arch rib is taken into the bridge state boom maximum tension position section, 4 m long. The local model of arch rib is divided into 233,788 units and 459,614 nodes, and the finite element model is shown in Fig. 9, stress analysis results are shown in Table 1.

Table 1
Flexure analysis results

Modal	Modal Eigenvalue	Instability mode
1	59.72	Main span transverse instability
2	99.04	Main arch symmetric instability
3	110.53	Main arch asymmetric instability
4	118.57	Asymmetric instability of side span
5	124.72	Side span symmetrical instability
6	125.33	Side arch asymmetric instability
7	149.85	Side arch symmetrical instability
8	153.73	Main bridge transverse instability
9	167.08	Main bridge symmetrical instability

According to the results of finite element analysis, the stress in the steel part at the foot of the arch is minimum 0.2 MPa and maximum 61.3 MPa, the stress in the core concrete part is within the range of –8.2 MPa ~ 0.1 MPa, no tensile stress is generated in the concrete at the connection of the arch foot, the maximum compressive stress is –9.3 MPa, the stress values at the foot of the arch meet the specification design requirements and are in a safe range.

2.5. Structural Stiffness

The Technical Specification for Steel Pipe Concrete Arch Bridge (GB 50923-2013) stipulates that the maxi-

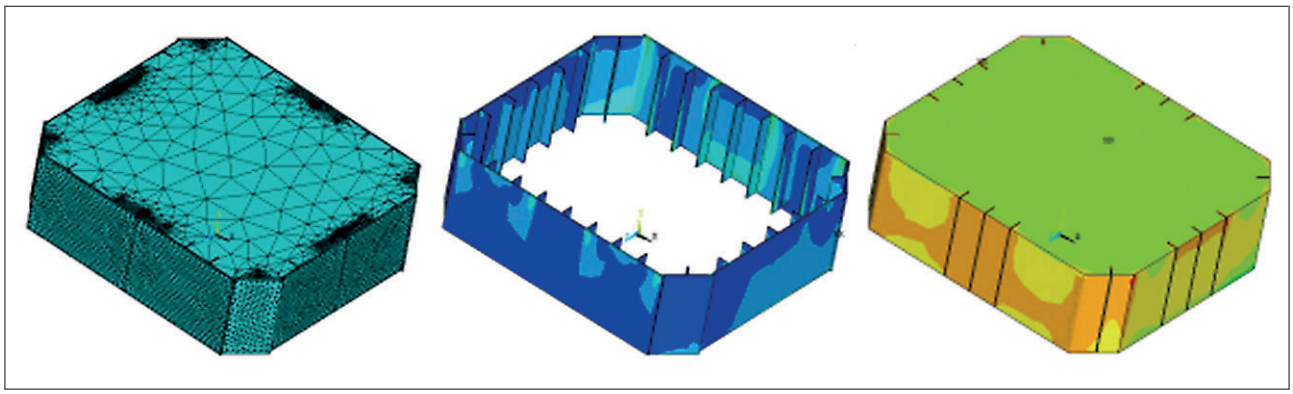

Fig. 9. **Local stress at the anchorage of arch foot**

mum vertical deflection caused by vehicle load should not be greater than L/800, L being the calculated span of the arch bridge structure.

According to Midas/Civil calculation results, considering the working conditions such as vehicle live load, the maximum vertical displacement of arch rib is 0.036 m ⩽150/800 = 0.18755 m, which meets the design requirements; the maximum vertical displacement of crossbeam is 0.072 m ⩽150/800 = 0.18755 m. Both stiffnesses meet the design requirements.

2.6. Structural Stability

Large-span arch bridge is extremely prone to structural instability (Fig. 10), and its stability is the key to the bridge. The stability analysis takes into account all the loads, the moving load is arranged according to the most unfavourable working condition of the arch foot axial force, the design wind speed is 24.0 m/s (10m high from the ground, 1% frequency, 10 min average maximum wind speed value), and the resistance coefficient of single arch rib section is 1.4.

The structural stability calculation of the bridge is carried out by the spatial finite element method, and the static stability analysis calculation model of the structure is the same as the structural dynamic characteristics analysis calculation model. In the calculation, the live load is applied to the bridge deck respectively, and the stability safety factor K of the structure is defined as Pcr/PT, where Pcr is the ultimate bearing capacity of the structure, PT is the sum of the self-weight of the structure and the operating live load in the bridge state, in fact K is the loading multiplier about PT when the structure reaches the ultimate bearing capacity.

2.7. Structural Dynamic Response

The dynamic characteristics of the structure were analyzed (Fig. 11) with a structural fundamental frequency of 1.127 Hz, which is far from the possible resonance region (Table 2).

3. CONSTRUCTION

3.1. Construction scheme

The steel members such as arch ribs and steel box girders can be processed and made in sections in the factory and assembled with brackets on site. The rest of the components can be cast-in-place construction process or off-site prefabricated lifting process [15].

Main construction steps:

1. Filling cofferdam; bored pile placement, construction of pile foundation and bearing platform.
2. Prefabricated steel components, processing steel components in the factory according to 1:1.
3. Driving into the bracket steel pipe pile foundation, erecting bracket and pre-pressing.
4. Bracing construction of longitudinal beams, installation of crossbeams and ordinary longitudinal beams.

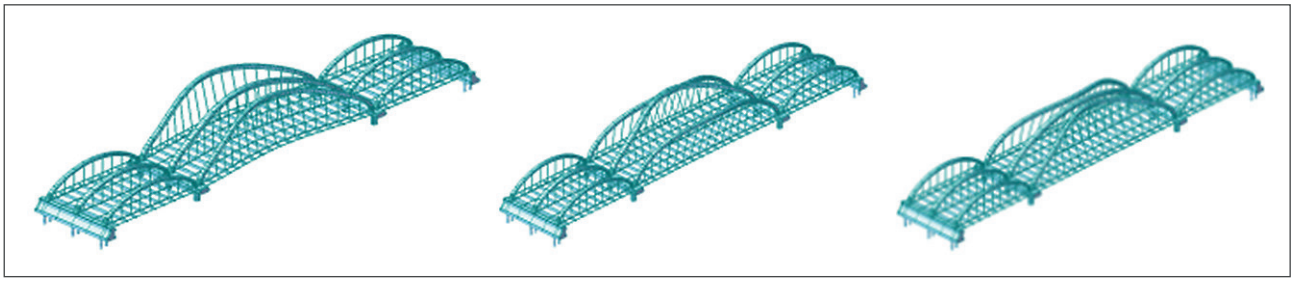

Fig. 10. **Arch bridge first third order instability mode**

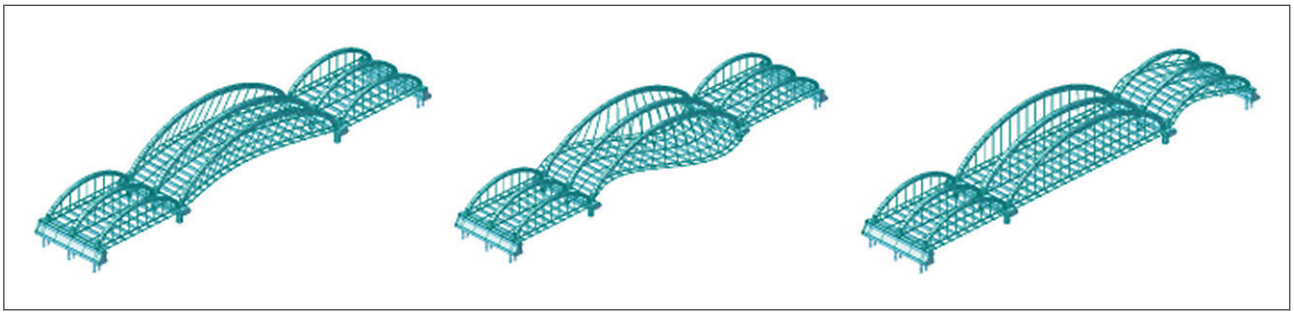

Fig. 11. **The first three orders of self-oscillation frequency of the arch bridge**

Table 2
Dynamic characteristics analysis results

Vibration Order	Period (s)	Frequency (Hz)	Self-vibration type
1	5.575	1.127	First-order transverse vibration of main span
2	2.810	2.236	First-order transverse vibration of main arch
3	2.629	2.390	Second-order transverse vibration of main arch
4	2.617	2.401	First-order vertical vibration of main span
5	1.860	3.379	First-order vertical vibration of side span
6	1.400	4.487	Second-order vertical vibration of side span
7	1.350	4.655	First-order vertical vibration of side span
8	1.342	4.683	First-order transverse vibration of side span
9	1.242	5.059	First-order vertical vibration of the main bridge
10	1.237	5.079	Second-order vertical vibration of the main bridge

5. On-site casting of bridge deck slabs.
6. Build the arch rib bracket and pre-pressure.
7. Slinging the main arch and installing wind bracing.
8. Installation of boom and tensioning.
9. Dismantle arch rib bracket.
10. Installation of bridge deck pavement, railings and decorative plates and other ancillary structures.
11. Dismantle the main beam bracket.
12. Static and dynamic load test.
13. Completion and acceptance, open to traffic operation.

3.2. Construction Process Analysis

Midas/Civil finite element software was used for the construction phase simulation analysis. Theoretical vertical curves are used as the reference for structural discretization. Simulate steel box beam, arch rib and cross beam with beam unit. Simulate the boom and horizontal bar with truss unit; Boundary condition treatment: a) permanent solidification at the bottom of the foundation; b) rigid connection in elastic connection between the cap beam and pile foundation [16, 17, 18]. The structure is discretized as a spatial rod system model, and the whole bridge is divided into 1546 nodes and 1949 units, and the geometric model of the whole bridge is shown in Fig. 12.

Combined with the construction process to divide the construction phases, divided into eight construction phases:

The first construction stage is the construction of piles, piers, cap beams and bridge abutments, and the consolidation of the base bottom surface.

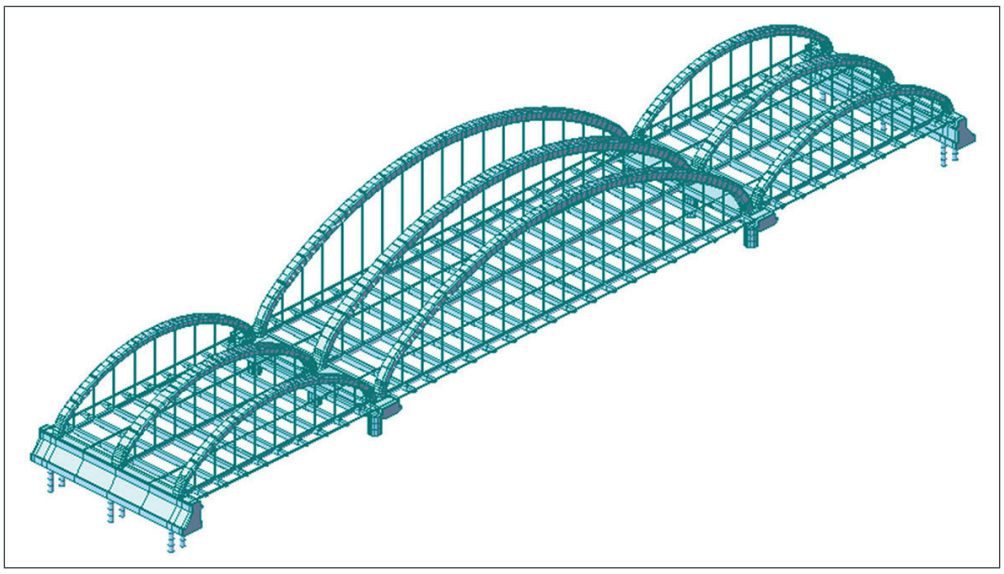

Fig. 12. **Arch bridge construction model**

Table 3
Table of maximum tensile and compressive stresses in the main beam of the boom for cable replacement

Change BoomCable Number	Maximum Beam Tensile Stress (MPa)	Maximum Beam Compressive Stress (MPa)	Change BoomCable Number	Maximum Beam Tensile Stress (MPa)	Maximum Beam Compressive Stress (MPa)
1-1-1	107.234	159.039	2-1-1	135.762	163.284
1-1-2	107.233	159.039	2-1-2	148.726	163.296
1-2-1	107.233	159.039	2-2-1	135.764	163.307
1-2-2	107.233	159.040	2-2-2	135.767	163.340
1-3-1	107.232	159.040	2-3-1	135.769	163.376
1-3-2	107.231	159.042	2-3-2	135.774	163.441
1-4-1	107.231	159.043	2-4-1	135.778	163.485
1-4-2	107.230	159.044	2-4-2	136.063	163.561
1-5-1	107.229	159.045	2-5-1	135.787	163.605
1-5-2	107.228	159.047	2-5-2	142.028	163.666
1-6-1	107.228	159.048	2-6-1	135.794	163.690
1-6-2	107.227	159.049	2-6-2	139.710	163.721
1-7-1	107.227	159.049	2-7-1	135.797	163.722
1-7-2	107.227	159.050	2-7-2	135.796	163.707
1-8-1	107.228	159.050	2-8-1	135.794	163.691
1-8-2	107.228	159.050	2-8-2	135.792	163.656
1-9-1	107.229	159.050	2-9-1	135.789	163.612
1-9-2	107.231	159.051	2-9-2	135.779	168.385
1-10-1	107.229	159.052	2-10-1	135.558	168.463
1-10-2	107.228	159.049	2-10-2	136.537	168.528
1-11-1	107.226	159.053	2-11-1	135.352	168.558
1-11-2	107.223	159.054	2-11-2	135.459	168.606
1-12-1	107.222	159.059	2-12-1	135.544	168.635
1-12-2	107.214	159.223	2-12-2	138.849	168.674
1-13-1	107.209	159.612	2-13-1	135.896	168.685
1-13-2	107.201	160.226	2-13-2	156.249	168.696
1-14-1	107.195	160.643	2-14-1	136.469	168.688
1-14-2	117.006	161.251	2-14-2	170.840	168.669
1-15-1	107.180	161.568	2-15-1	137.239	168.642
1-15-2	126.839	162.062	2-15-2	182.869	168.595
1-16-1	107.162	162.302	2-16-1	140.020	168.552
1-16-2	133.357	162.659	2-16-2	192.402	168.483
1-17-1	107.143	162.821	2-17-1	136.325	168.429
1-17-2	136.201	163.048	2-17-2	198.743	168.342
1-18-1	107.125	163.142	2-18-1	132.983	168.281
1-18-2	135.362	163.262	2-18-2	184.432	168.183
Maximum tensile stress (MPa)		198.743	Maximum tensile stress (MP)		168.696

The second construction stage is the construction of the side span arch footing, lifting and assembling, setting temporary consolidation.

The third construction stage is the construction of the remaining sections of the side span arch ribs.

The fourth construction stage is the construction of the mid-span arch footing, activating temporary boundary conditions.

The fifth construction stage is the construction of the remaining arch ribs of the middle span.

The sixth construction stage is the tensioning of the booms of the two side spans and activation of the corresponding crossbeams, longitudinal beams and longitudinal connection tubes.

The seventh construction stage is the tensioning of the booms of the middle span and activation of the corresponding crossbeams, longitudinal beams and longitudinal connection tubes.

The eighth construction stage is the tensioning of the horizontal ties and the removal of the temporary boundary conditions.

4. CONCLUSION

This essay proposes a new structural system of three-arch, three-cable face steel edge main girder rigid tie combination arch bridge, which consists of under-bearing steel box-concrete combination tie arch bridge, high performance stiffened steel plate steel-concrete combination structure deck system, and steel pipe restrained concrete combination structure pier, together forming a full combination structure bridge system. Through the analysis of the design and research of the three-arch, three-cable face steel edge main girder rigid tied arch bridge, the following conclusions are drawn:

(1) The structural load-bearing capacity meets the design requirements. After the most unfavourable combination of constant load, live load, temperature and other loads, the maximum stress of the structural system is 115.9 MPa, which meets the requirements of the design specification.

(2) The overall stiffness of the structure is large. Considering the vehicle load, the maximum vertical displacement of the arch rib is 0.036 m $\leqslant$ 15/800 = 0.18755 m, which meets the design requirements of the code; the maximum vertical displacement of the crossbeam is 0.072 m $\leqslant$ 15/800 = 0.18755 m, which meets the design requirements of the code.

(3) The structural dynamic performance is good. The first-order self-oscillation frequency of the main girder is 1.127 Hz, which is the transverse drift of the main span deck, and the overall stiffness of the main arch and deck structure is good.

(4) The structural stability is good. The first-order buckling stability analysis eigenvalue is 59.72, greater than the design specification requirements of not less than 4.0 requirements, arch bridge and bridge deck structural stability is good.

(5) Arch bridge arch ribs, steel girders and other steel members can be processed in sections in the factory, the site cable tower without bracket installation. The rest of the components can be cast-in-place construction process or off-site prefabricated lifting process, advanced technology, reasonable forces, construction and environmental protection.

In summary, this paper proposes a three-arch, three-cable face side main beam rigid ties combination arch bridge, reasonable structure, advanced technology, economic cost, beautiful shape. The main arch and deck structure meet the requirements of strength, stiffness, stability and dynamic characteristics, and have better mechanical performance and economy than the traditional arch bridge, which has a wide range of engineering application prospects.

REFERENCES

1. Mao Yisheng. *Bridge history*. Beijing Publishing House; 2012.

2. Wang Guoding, Zhong Shengbin. *Arch Bridge*. China communication press; 1997.

3. Li Yong, Chen Yiyan, Nie Jianguo, Chen Baochun. *Design and application of steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2002. Version 1.

4. Li Yong. *Theory and application of long-span steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2013.

5. Li Yong. *Wave truss composite structure bridge*. Science Press; 2015.

6. Nie Jianguo, Tao Muxuan, Wu Lili. New progress in research of steel-concrete composite bridge. *China Civil Engineering Journal*. 2012; 45(6): 13.

7. Pan Jiyan. Long span steel bridge: Special invitation report of the Ninth National Academic Conference on Structural Engineering. *Engineering Mechanics*. 2000; 1(A01): 5.

8. Lin Yangzi, Huang Qiao, Ren Yuan. Optimization and shape selection of arch axis of arch bridge. *Highway transportation technology*. 2007; 24(003): 59–63.

9. Yang Yunbiao, Li Jian, Peng Jun. Adjustment of arch axis of long span half through arch *bridge. Shanghai Highways*. 2001; (1): 4.

10. Liu Jiusheng, Wang Guoding. Discussion on allowable deviation of arch axis of long span arch bridge. *East China highway.* 2000; (6): 2.

11. Qin Haiye. Discussion on stiffness ratio of tie bar and arch rib in rigid tie bar arch bridge. *Zhejiang Hydrotechnics*. 2002; (6): 2.

12. Chen Baochun. Research Progress on calculation theory of concrete filled steel tube arch bridge. *China Civil Engineering Journal*. 2003; 36(12): 11.

13. Nie Jianguo. Calculation and analysis of long-term deformation of steel-concrete composite beams. *Building Structure*.1997; (1): 4.

14. Ning Lianwang. Theory and development of ANSYS finite element analysis. *Shanxi science and technology*. 2008; (4): 3.

15. Chen Baochun. Research on construction of concrete filled steel tube arch bridge. *Bridge construction*. 2002; (3): 55–59.

16. Qiu Bo, Liu Guangdong. Stability analysis of long span concrete filled steel tube arch bridge during construction. *Highway engineering*. 2003; 28(002): 35–36.

17. Zhang Min, Zhou Shuixing, Hu Mianyi. Research on construction control principle and control analysis algorithm of concrete filled steel tube arch bridge. *Highway transportation technology*. 2003; 20(2): 39–42.

18. Zhao Lei, Bu Yizi. Time varying mechanical analysis of construction stability of long span arch bridge. *Railway Transaction*. 2000; 22(005): 55–59.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Xiangyu Li – Shenzhen College of international Education, Shenzhen, Guangdong 518110, China, katherineli0207@gmail.com

Luojin Cao – Engineering degree, Senior engineer, Shenzhen Bridge Design and Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518043, China, 281853271@qq.com

Cheng Zhang – Dr. Sci. (Eng.), professor, Shenzhen Bridge Design and Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518043, China, liy2000@163.com

Liping Ma – engineer, senior engineer, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China, 2223076073@qq.com

Yong Li – Dr. Sci. (Eng.), professor, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China, Liy2000@163.com

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 02.08.2022; approved after reviewing 25.08.2022; accepted for publication 31.08.2022.

Научная статья
УДК 691
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-328-338

CC BY 4.0

Трехарочный трехканатный торцевой стальной балочный композитный арочный мост жесткого типа

Сианунь Ли[2], Луоджин Цао[3], Чен Жан[3], Липин Ма[1], Юн Ли[1,*]

[1] Колледж гражданского и транспортного машиностроения, Шэньчжэньский университет, Шэньчжэнь, Гуандун 518060, Китай
[2] Шэньчжэньский колледж международного образования, Шэньчжэнь, Гуандун 518110, Китай
[3] Шэньчжэньский институт проектирования и исследований мостов, Шэньчжэнь, Гуандун 518043, Китай

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: Liy2000@163.com

АННОТАЦИЯ: В статье предлагается новая конструктивная система для крупнопролетного трехарочного трехканатного композитного арочного моста со стальной кромкой главной балки с жесткой связью, изобретена новая конструктивная форма жесткой стальной кромки главной балки, а также авторы разработали и спроектировали ключевую арочно-стержневую трехмерную шестигранную пространственную узловую структуру. Результаты анализа показывают, что по сравнению с традиционным арочным мостом композитный арочный мост с тремя арками и тремя тросами с большим пролетом имеет красивую форму, логичную структуру, эффективную конструкцию, представляет собой высокопрочную, высокопроизводительную композитную конструкционную систему с лучшей прочностью, жесткостью, стабильность, динамические характеристики которого решают проблемы горизонтальной тяги арочного моста со сверхширокими пролетами, улучшают плохую поперечную устойчивость, а также уменьшают ключевые технические проблемы управления кабельными соединениями, что имеет перспективы широкого применения в инженерных проектах такого типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: арочный мост, композитная структура, обоснованная ось свода, стальная кромка главной балки, жесткие связи, высокопроизводительная конструкционная система.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сианунь Ли, Луоджин Цао, Чен Жан, Липин Ма, Юн Ли. Трехарочный трехканатный торцевой стальной балочный композитный арочный мост жесткого типа // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 328–338. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-328-338. – EDN: JVKBSO.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mao Yisheng. *Bridge history*. Beijing Publishing House; 2012.
2. Wang Guoding, Zhong Shengbin. *Arch Bridge*. China communication press; 1997.
3. Li Yong, Chen Yiyan, Nie Jianguo, Chen Baochun. *Design and application of steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2002. Version 1.
4. Li Yong. *Theory and application of long-span steel-concrete composite bridge*. Science Press; 2013.
5. Li Yong. *Wave truss composite structure bridge*. Science Press; 2015.
6. Nie Jianguo, Tao Muxuan, Wu Lili. New progress in research of steel-concrete composite bridge. *China Civil Engineering Journal*. 2012; 45(6): 13.
7. Pan Jiyan. Long span steel bridge: Special invitation report of the Ninth National Academic Conference on Structural Engineering. *Engineering Mechanics*. 2000; 1(A01): 5.
8. Lin Yangzi, Huang Qiao, Ren Yuan. Optimization and shape selection of arch axis of arch bridge. *Highway transportation technology*. 2007; 24(003): 59–63.
9. Yang Yunbiao, Li Jian, Peng Jun. Adjustment of arch axis of long span half through arch *bridge. Shanghai Highways*. 2001; (1): 4.

© Сианунь Ли, Луоджин Цао, Чен Жан, Липин Ма, Юн Ли, 2022

10. Liu Jiusheng, Wang Guoding. Discussion on allowable deviation of arch axis of long span arch bridge. *East China highway.* 2000; (6): 2.

11. Qin Haiye. Discussion on stiffness ratio of tie bar and arch rib in rigid tie bar arch bridge. *Zhejiang Hydrotechnics*. 2002; (6): 2.

12. Chen Baochun. Research Progress on calculation theory of concrete filled steel tube arch bridge. *China Civil Engineering Journal*. 2003; 36(12): 11.

13. Nie Jianguo. Calculation and analysis of long-term deformation of steel-concrete composite beams. *Building Structure.*1997; (1): 4.

14. Ning Lianwang. Theory and development of ANSYS finite element analysis. *Shanxi science and technology*. 2008; (4): 3.

15. Chen Baochun. Research on construction of concrete filled steel tube arch bridge. *Bridge construction*. 2002; (3): 55–59.

16. Qiu Bo, Liu Guangdong. Stability analysis of long span concrete filled steel tube arch bridge during construction. *Highway engineering*. 2003; 28(002): 35–36.

17. Zhang Min, Zhou Shuixing, Hu Mianyi. Research on construction control principle and control analysis algorithm of concrete filled steel tube arch bridge. *Highway transportation technology*. 2003; 20(2): 39–42.

18. Zhao Lei, Bu Yizi. Time varying mechanical analysis of construction stability of long span arch bridge. *Railway Transaction*. 2000; 22(005): 55–59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ли Сианунь – научный сотрудник, Шэньчжэньский колледж международного образования, Шэньчжэнь, Гуандун 518110, Китай, katherineli0207@gmail.com

Цао Луоджин – инженер, старший научный сотрудник, Шэньчжэньский институт проектирования и исследований мостов, Шэньчжэнь, Гуандун 518043, Китай, 281853271@qq.com

Жан Чен – доктор технических наук, профессор, Шэньчжэньский институт проектирования и исследований мостов, Шэньчжэнь, Гуандун 518043, Китай, liy2000@163.com

Ма Липин – старший научный сотрудник, инженер, Колледж гражданского и транспортного машиностроения, Шэньчжэньский университет, Шэньчжэнь, Гуандун 518060, Китай, 2223076073@qq.com

Ли Юн – доктор технических наук, профессор, Колледж гражданского и транспортного машиностроения, Шэньчжэньский университет, Шэньчжэнь, Гуандун 518060, Китай, Liy2000@163.com

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы внесли равный вклад в эту статью.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.08.2022; одобрена после рецензирования 25.08.2022; принята к публикации 31.08.2022.

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 плагаиата, 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 плосле 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 у 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 the 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 nanotechnology and nanomaterials;
- 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 and 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)
Acknowledgments: (if available) (In English)
For citation: (In English)

Example.
For citation: Sinitsin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for building purposes: production technology and applications. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(4): 213–221. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.

© authors, 2021

Text of the paper: (In English, number of words 3000–6000)
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSIONS**

References (In English) (Vancouver Style)

Information about the author (authors) (In English)
– first name, last name (full);
– academic degree;
–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.), 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):
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, all authors made equal contribution to preparation of the article, 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)
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: Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.

© authors, 2021

Text of the paper: (In Russian, number of words 3000–6000)
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSIONS**

References (In Russian) (Vancouver Style)

Information about the author (authors) (In Russian)
– first name, last name (full);
– academic degree;
–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.
Писаренко Жанна Викторовна – д-р экон. наук, доцент кафедры управления рисками и страхования экономического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, 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, all authors made equal contribution to preparation of the article, etc.).

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.

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).

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 соотвествует 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 нанотехнологий и наноматериалов;
- 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 Отчество (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)
Acknowledgments: (при наличии) (In English)
For citation: (In English)

Пример.
For citation: Sinitsin D.A., Shayakhmetov U.Sh., Rakhimova O.N., Khalikov R.M., Nedoseko I.V. Nanostructured foam ceramics for building purposes. *Nanotechnologies in Construction*. 2021;13(4):213–221. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.

© authors, 2021

Статья ((In English) объем – 3–6 тыс. слов):
- **INTRODUCTION**
- **METHODS AND MATERIALS**
- **RESULTS**
- **DISCUSSION**
- **CONCLUSION**

References (In English) (согласно Vancouver Style)

Information about the author (authors) (In English)
– имя, отчество, фамилия автора (полностью);
– ученое звание;
– ученая степень;
– 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):

фамилия и инициалы автора; в краткой форме описывается личный вклад автора в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации 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)

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: Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.

© авторы, 2021

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)

Информация об авторе (-ах) (на русском языке)
– фамилия имя отчество автора (полностью);
– ученое звание;
– ученая степень;
– 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 – д-р экон. наук, доцент 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, все авторы сделали эквивалентный вклад (равный вклад) в подготовку публикации 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 14 Times New Roman 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).

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.

Оформление ссылок на источники, библиографических ссылок осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.7–2021.

Авторские права

Авторы, публикующие 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.