ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова ISSN 2071-7318



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ВЕСТНИК БГТУ им. В.Г. ШУХОВА

№ 2, 2020 год

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова научно-теоретический журнал

К рассмотрению и публикации в НТЖ «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» принимаются научные статьи и обзоры по фундаментальным и прикладным вопросам в области строительства, архитектуры, производства строительных материалов и композитов специального назначения, химических технологий, машиностроения и машиноведения, освещающие актуальные проблемы отраслей знания, имеющие теоретическую или практическую значимость, а также направленные на внедрение результатов научных исследований в образовательную деятельность.

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- **05.23.03** Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 05.23.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)
- **05.23.20** Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- **05.23.21** Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 05.23.22 Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 05.23.22 Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 05.17.06 Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)
- **05.17.11** Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- **05.02.07** Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 05.02.08 Технология машиностроения (технические науки)
- **05.02.13** Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки)

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами – признанными специалистами в соответствующей отрасли знания. Копии рецензий или мотивированный отказ в публикации предоставляются авторам и в Минобрнауки России (по запросу). Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права, плагиата и клеветы, и этических принципах, поддерживаемых международным сообществом ведущих издателей научной периодики и изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (СОРЕ).

Официальный сайт журнала: https://bulletinbstu.editorum.ru
Тел: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru.
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 44446.
Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov scientific and theoretical journal

Scientific articles and reviews on fundamental and applied questions in the field of construction, architecture, productions of construction materials and composites of a special purpose, chemical technologies, machine building and engineering science covering the current problems of branches of knowledge having the theoretical or practical importance and also directed to introduction of research results in educational activity are accepted to be considered and published in the journal.

The journal is included in the list for peer-reviewed scientific publications approved by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences, for scientific specialties and relevant branches of science:

05.23.01	_	Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
05.23.03	_	Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
05.23.05	_	Building materials and products (technical sciences)
05.23.20	_	Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural herit-
		age (architecture)
05.23.21	_	Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
05.23.22	_	Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
05.23.22	_	Urban planning, rural settlement planning (architecture)
05.17.06	_	Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
05.17.11	_	Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
05.02.05	_	Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
05.02.07	_	Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
05.02.08	_	Engineering technology (technical sciences)
05.02.13	_	Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences)

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers – recognized experts in the relevant branch of knowledge. Copies of reviews or motivated refusal in the publication are provided to the authors and to the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (on request). Reviews are stored in the editorial office for 5 years.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright, plagiarism and slander, and the ethical principles maintained by the international community of the leading publishers of the scientific periodical press and stated in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

Official website of the journal: https://bulletinbstu.editorum.ru Tel.: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/

© Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2020

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Заместитель главного редактора

Уваров Валерий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., директор инженерно-строительного института, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Члены редакционной коллегии

Айзенштадт Аркадий Михайлович, д-р хим. наук, проф., заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии Высшей инженерной школы, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (РФ, г. Архангельск). Ахмедова Елена Александровна, член-корр. РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Баженов Юрий Михайлович, академик РААСН наук, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетона НИУ Московского государственныого строительного университета (РФ, г. Москва).

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш). Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Борисов Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии цемента и композиционных материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Братан Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Севастопольского государственного университета (РФ, г. Севастополь).

Везенцев Александр Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой общей химии Белгородского государственного национального исследовательского университета (РФ, г. Белгород).

Глаголев Сергей Николаевич, д-р экон. наук, ректор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Грабовый Петр Григорьевич, д-р экон. наук, проф., заведующий кафедрой организации строительства и управления недвижимостью, НИУ Московского государственныого строительного университета (РФ, г. Москва).

Гридчин Анатолий Митрофанович, д-р техн. наук, проф., Президент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (РФ, г. Москва).

Дуюн Татьяна Александровна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород)

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., декан архитектурно-строительного факультета, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, директор НИИ «Материаловедение» Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарёва (РФ, Республика Мордовия, г. Саранск).

Зайцев Олег Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Академии строительства и архитектуры – структурное подразделение Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского (РФ, г. Симферополь).

Ильвицкая Светлана Валерьевна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры Государственного университета по землеустройству (РФ, г. Москва).

Козлов Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета (РФ, г. Липецк).

Леонович Сергей Николаевич, иностранный член академик РА-АСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета (Республика Беларусь, г. Минск).

Лесовик Валерий Станиславович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Логачев Константин Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Мещерин Виктор Сергеевич, PhD, проф., директор института строительных материалов и заведующий кафедрой строительных материалов Дрезденского Технического Университета (Германия, г. Дрезден).

Меркулов Сергей Иванович, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства Курского государственного университета (РФ, г. Курск).

Павленко Вячеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., директор института химических технологий, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Павлович Ненад, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш). Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Пивинский Юрий Ефимович, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ООО «Научно-внедренческая фирма «КЕРАМБЕТ-ОГ-НЕУПОР» (РФ, г. Санкт-Петербург).

Потапов Евгений Эдуардович, д-р хим. наук, проф. МИРЭА – Российского технологического университета (РФ, г. Москва).

Рыбак Лариса Александровна, д-р техн. наук, проф. кафедры технологии машиностроения Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Савин Леонид Алексеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой мехатроники, механики и робототехники Орловского государственного университет имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Семенцов Сергей Владимирович, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектурного и градостроительного наследия Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (РФ, г. Санкт-Петербург).

Сиваченко Леонид Александрович, д-р техн. наук, проф., кафедры транспортных и технологических машин Белорусского-Российского университета (Республика Беларусь, г. Могилев).

Соболев Константин Геннадьевич, PhD, проф. Университета Висконсин-Милуоки (штат Висконсин, Милуоки, США).

Смоляго Геннадий Алексеевич, д-р техн. наук, проф. кафедры строительства и городского хозяйств Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Строкова Валерия Валерьевна, проф. РАН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Фишер Ханс-Бертрам, Dr.-Ing., Ваймар (Германия, г. Веймар).

Ханин Сергей Иванович, д-р техн. наук, проф. кафедры механического оборудования Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шаповалов Николай Афанасьевич, д-р техн. наук, проф. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Шубенков Михаил Валерьевич, академик РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства, проректор по образованию в области градостроительства и урбанистики Московского архитектурного института (государственная академия) (РФ, г. Москва).

Юрьев Александр Гаврилович, д-р техн. наук, проф., кафедры теоретической механики и сопротивления материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Янун Сергей Федорович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры механики, мехатроники и робототехники Юго-Западного государственного университета (РФ, г. Курск).

CHIEF EDITOR

Evgeniy I. Evtushenko, Doctor of Technical Sciences, Professor; First Vice-Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

Valery A. Uvarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

Arkadiy M. Ayzenshtadt, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (Russian Federation, Arkhangelsk).

Elena A. Akhmedova, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Samara State Technical University, Academy of Construction and Architecture (Russian Federation, Samara).

Yuriy M. Bazhenov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

Deyan Blagoevich, PhD, Professor, Higher Technical School of Professional Education in Nish (Republic of Serbia, Nish).

Aleksandr I. Vezentsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod National Research University (Russian Federation, Belgorod).

Vasiliy S. Bogdanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Ivan N. Borisov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey M. Bratan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Sevastopol State University (Russian Federation, Sevastopol).

Sergey N. Glagolev, Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Petr G. Grabovy, Doctor of Economic Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National research University) (Russian Federation, Moscow).

Anatoliy M. Gridchin, Doctor of Technical Sciences, Professor, President, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Aleksey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Director NIIZHB named after A.A. Gvozdeva AO «NIC «Stroitel'stvo» (Russian Federation, Moscow)

Tatyana A. Duyun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute "Materials Science", National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev (Russian Federation, Republic of Mordovia, Saransk).

Oleg N. Zaytsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Russian Federation, Simferonal)

Svetlana V. Il'vitskaya, Doctor of Architecture, Professor, State University of Land Use Planning (Russian Federation, Moscow).

Aleksandr M. Kozlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University (Russian Federation, Lipetsk).

Valery S. Lesovik, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey N. Leonovich, Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk).

Konstantin I. Logachev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

Sergei I. Merkulov, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kursk State University (Russian Federation, Kursk).

Vyacheslav I. Pavlenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Margarita V. Per'kova, Doctor of Architecture, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Nenad Pavlovich, PhD, Vice-rector for Scientific Work and Publishing Activities, Professor, Mechanical Engineering Faculty State University of Nish (Republic of Serbia, Nish).

Yuriy E. Pivinski, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the "Research and development company" KERAMBET-OGNEUPOR" (Russian Federation, Saint Petersburg).

Evgeniy E. Potapov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University (Russian Federation, Moscow).

Larisa A. Rybak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Leonid A. Savin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Russian Federation, Orel).

Sergey V. Sementsov, Doctor of Architecture, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Russian Federation, Saint Petersburg).

Leonid A. Sivachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian-Russian University (Republic of Belarus, Mogilev).

Konstantin G. Sobolev, PhD, Professor, University of Wisconsin-Milwaukee (USA).

Gennadiy A. Smolyago, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Valeriya V. Strokova, Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Hans Bertram Fischer, Dr.-Ing., Deputy Head of the Construction Materials Department, Bauhaus-University of Weimar (Bauhaus-Universität Weimar) (Germany, Weimar).

Sergey I. Khanin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Nikolai A. Shapovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Mikhail V. Spubenkov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction, Doctor of Architecture, Professor, Moscow Institute of Architecture (State Academy) (Russian Federation, Moscow)

Aleksandr G. Yur'yev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Sergey F. Yatsun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southwest State University (Russian Federation, Kursk).

\mathbf{C}^{r}	ГР		11	T	ΓÌ	F 1	L	C	\mathbf{T}	R	\cap	I	T	٨	P	7	71	1	$\Gamma \gamma$	ויו	Γ	k	ረግ	Γ7	V	P	٨
•		•	,,			1 /- /		•			•	, ,		_		\sim	•	~ 1			١,		. I		▼ 1		-

Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПАЛ-КРИСТОБАЛИТ-ТРИДИМИТОВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ В ТЯЖЕЛОМ БЕТОНЕ	8
Вабищевич К.Ю., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Хозеев Е.О.	O
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ РЕЗИНЫ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ВЯЖУЩЕГО	
В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ	18
Алшахван А., Калгин Ю.И.	10
АЛШАХВАН А., КАЛГИН Ю.И. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	
ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В УСЛОВИЯХ СИРИЙСКОЙ	
ДЛЯ ДОГОЖНОГО СТГОИТЕЛЬСТВА В УСЛОВИЯХ СИГИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ	26
	20
Фролов Н.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗВИТИЯ КОРРОЗИОННЫХ	
ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОНА В ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ	
ПРИ СИЛОВЫХ И СРЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	34
Рыбникова И.А., Рыбников А.М.	
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ НАТУРНЫХ	
БУРОНАБИВНЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ	44
Юрьев А.Г., Зинькова В.А.	
ОПТИМИЗАЦИЯ НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРМ	56
Алексеев Ю.В., Перекопская М.А.	30
ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЕРРИТОРИЙ С РАЗВИТЫМ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫМ	
КОМПЛЕКСОМ (НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)	62
Петрусенко Ю.В	02
ЛЕЧЕБНЫЕ УЧРЕЖДЕНИЯ В ТВОРЧЕСТВЕ АРХИТЕКТОРА НИКОЛАЯ МАТВЕЕВИЧА	
ЛЕЧЕВНЫЕ УЧЕЖДЕНИЯ В ТВОГЧЕСТВЕ АГАИТЕКТОГА ПИКОЛАЯ МАТВЕЕВИЧА СОКОЛОВА. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ	72
	12
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	
Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В.	
РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ	
СМЕСЕЙ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ	85
Ключникова Н.В., Пискарева А.О., Урванов К.А., Гордеев С.А., Генов И.	
ВЛИЯНИЕ ШУНГИТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО	
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА	96
Бондаренко Н.И., Пучка О.В., Бессмертный В.С., Чуев С.А., Изотова И.А., Брагина Л.Л.,	
Яловенко Т.А.	
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ	
ОБЛИЦОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕШАННОГО СТЕКЛОБОЯ	106
Дякин П.В., Пивинский Ю.Е., Прохоренков Д.С., Дороганов В.А.	
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ	
НА ОСНОВЕ ВКВС БОКСИТА КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА	
В СИСТЕМЕ $Al_2O_3 - SiO_2 - SiC$	115
Кожухова Н.И., Жерновская И.В., Череватова А.В., Соболев К.Г.	
РОЛЬ ЖЕЛЕЗО СОДЕРЖАЩЕГО КОМПОНЕНТА В СОСТАВЕ ПЕРЛИТОВОГО	
ГЕОПОЛИМЕРА НА ЕГО ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ	126
Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д.	120
ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	
И ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ	134
	137
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ	
Романцов Р.С., Юракова Т.Г.	
МЕТОД ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В ПОВЫШЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ	
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ	142
Поляков А.Н., Никитина И.П.	
ПРИМЕНЕНИЕ МОДАЛЬНОГО ПОДХОДА К ПОСТРОЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ	
ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКОВ, РАБОТАЮЩИХ В СЛОЖНОМ РЕЖИМЕ	149

USE OF OPAL-CRYSTOBALITE-TRIDIMITE MICRO-FILLER IN HEAVY CONCRETE Vabishchevich K.Yu., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Hoseev E.O. USE OF RUBBER WASTE TO MODIFY THE BINDER IN ASPHALT CONCRETE Alshabwan A., Kalgin Yu.I. THE IMPORTANCE OF THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR CONSTRUCTION ROADS IN CONDITIONS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC 26 Frolov N.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS Rybnikova L.A., Rybnikov A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES Vuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS SK Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Vy.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLLE OF FE-BEARNING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS KITILOVA, A., Besceva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE	CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE	
Vabischevich K.Yu., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Hoseev E.O. USE OF RUBBER WASTE TO MODIFY THE BINDER IN ASPHALT CONCRETE Alshahawa A., Kalgin Yu.I. THE IMPORTANCE OF THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR CONSTRUCTION ROADS IN CONDITIONS OF THE SYRIAM ARAB REPUBLIC Frolov N.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES Viriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) POPTIMIZATION ON THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. REL AXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF RENFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS KOZINIKOWA N.I., Phernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF F-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS KIRIIDOVA N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE BUILDING PRODUCTS	Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V.	
USE OF RUBBER WASTE TO MODIFY THE BINDER IN ASPHALT CONCRETE Alshahwan A., Kalgin Yu.I. THE IMPORTANCE OF THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR CONSTRUCTION ROADS IN CONDITIONS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC Frolov N.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS 34 Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES Yuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alckseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS SKJyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL BONDARICH ON HIS DESCRIPTION OF THE MORE SANDLED AND SAND		8
Alshahwan A., Kalgin Yu.I. THE IMPORTANCE OF THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR CONSTRUCTION ROADS IN CONDITIONS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC Frolov N.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS Rybnikova A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES Vuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alcksecy Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) FORESTRY COMPLEX (ON THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL BONDARIENO N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF RINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF RINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS KOZHUKHOWA N.I., Zherovaksva I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 115 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		1.0
THE IMPORTANCÉ OF THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR CONSTRUCTION ROADS IN CONDITIONS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC Frolov N.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS 34 Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES 44 YURICY A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) EVERTIMENT OF THE MORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS SKIYUCHNIKOVA N.V., Piskareva O.A., Urvanov K.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL BONDAISH MATERIAL		18
ROADS IN CONDITIONS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC Frolov N.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES 44 Yuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) FORESTRY COMPLEX (ON THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS 72 CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanov K.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL BONDAYARE MALVER SEASMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS KIRIIlova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS Ployakov A.N., Nikitina I.P.		
Frolov N.V. EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS AND ENVIRONMENTAL EFFECTS AND ENVIRONMENTAL EFFECTS ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES 44 YURI'VE A.G., ZIRKOVA V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alckseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanovk.A., Gordev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL BONDARD T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Közhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 115 KOZHUKHOVA N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS AMACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		26
DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS 34 Rybnikova LA., Rybnikova AM. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES 44 Vuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alckseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) 62 Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS 72 CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS KJyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS KOZHUKHOVA N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	Frolov N.V.	
AND ENVIRONMENTAL EFFECTS Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES 44 Yuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES 56 Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) 62 Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS 72 CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanovk.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF Fe.BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE	
Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES 44 Yuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES 66 Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) 62 Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS 72 CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova L.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS KOZhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE	
ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES 44 Vuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES 56 Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) 62 Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS 72 CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EDOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	AND ENVIRONMENTAL EFFECTS	34
BORED CONICAL PILES Yuriev A.G., Zinkova V.A. Yuriev A.G., Zinkova V.A. APPROACH TO THE METAL TRUSSES Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS KOZHUKHOVA N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 115 Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		
Yuriev A.G., Zinkova V.A. LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) BEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Vurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		4.4
LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanovk.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL BONDAIRENKO T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		44
Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) APPEROACH TO THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) APPEROACH TO THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) APPELICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGICAL SOLLBY MINERAL MODIFIERS APPELICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS AMACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		56
APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanovk.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS KOZHUKHOVA N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		30
FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION) Petrusenko Y.V. MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanov K.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		
MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanov K.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL BONDAIRE MATERIAL FECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS KOZHUKHOVA N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION)	62
NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanovk.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS AACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	Petrusenko Y.V.	
CHEMICAL TECHNOLOGY Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS SKIyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT	
Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanov K.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS	72
RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS \$5 Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	CHEMICAL TECHNOLOGY	
OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V.	
Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., UrvanovK.A., Gordeev S.A. INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES	
INFLUENCE OF SHUNGITE ON PÉRFORMANCÉ PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL 96 Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET 106 Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS	85
COMPOSITE MATERIAL Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Doyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		
Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		0.6
Yalovenko T.A. TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		96
TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
BASED ON MIXED CULLET Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		
Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		106
EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS 126 Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		100
ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOILBY MINERAL MODIFIERS	115
WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G.	
Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS 134 MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER	
APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS	126
AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		
MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		124
Romantsov R.S., Yurakova T.G. EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.		
EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS 142 Polyakov A.N., Nikitina I.P.	MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE	\mathbf{E}
OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS Polyakov A.N., Nikitina I.P.	Romantsov R.S., Yurakova T.G.	
Polyakov A.N., Nikitina I.P.		1.46
		142
AFFLICATION OF THE MODAL AFFROACH TO THE CONSTRUCTION		
OF THERMAL CHARACTERISTICS OF MACHINES OPERATING IN COMPLEX MODE 149	OF THERMAL CHARACTERISTICS OF MACHINES OPERATING IN COMPLEX MODE	149

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17

*Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В.

Брянский государственный инженерно-технологический университет *E-mail: natluk58@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПАЛ-КРИСТОБАЛИТ-ТРИДИМИТОВОГО МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ В ТЯЖЕЛОМ БЕТОНЕ

Аннотация. Рассмотрен опал-кристобалит-тридимитовый микронаполнитель (ОКТМН) для тяжелого бетона (ТБ), полученный диспергированием кремнистой породы осадочного происхождения – абиоморфного силицита фракции 0,315-0,63 мм. Определены химико-минеральный состав и микроструктура частиц ОКТМН. Представлен сравнительный анализ зависимости гранулометрического состава, среднего диаметра частиц и удельной поверхности ОКТМН от времени диспергирования в механоактиваторах ударно-истирающего и кавитационного типов действия. Кондуктометрическим экспресс-методом анализа исследовано влияние удельной поверхности ОКТМН на гидратационную активность цемента. Выявлено оптимальное значение удельной поверхности ОКТМН $(880-900 \text{ м}^2/\text{кz})$, достигаемое в результате кавитационного диспергирования в течение 5-10 минут, которое обеспечивает повышение гидратационной активности цемента на 52-54 %. Методом математического планирования эксперимента установлена зависимость прочности ТБ через 28 суток твердения от расхода его компонентов, что позволяет прогнозировать значение этого показателя при варьировании состава бетонной смеси. Выполнена оценка эффективности ОКТМН. Установлен максимальный эффект действия опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя при использовании его в количестве до 5 % от массы цемента с позиции повышения проектной (марочной) прочности на сжатие ТБ (до 126 %).

Ключевые слова: тяжелый бетон, опал-кристобалит-тридимитовый микронаполнитель, абиоморфный силицит, ударно-истирающее диспергирование, кавитационное диспергирование, гидратационная активность, прочность на сжатие.

Введение. В современных условиях рынок потребления бетонов на основе цементных вяжущих является одним из самых динамично развивающихся. Совершенствование строительных технологий, необходимость обеспечения долговечности и надежности работы конструкций и сооружений предъявляют все более высокие требования к качеству применяемых при их возведении бетонов. В связи с этим, разработка эффективных бетонов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами является актуальным и перспективным научно-практическим направлением в области строительного материаловедения [1].

В настоящее время к наиболее распространенному технологическому приему целенаправленного регулирования структурой и свойствами цементных бетонов относится использование различных минеральных наполнителей [2–4], получаемых современными способами активации [5] природного и техногенного сырья силикатного (диатомиты, трепелы, опоки, пеплы, туфы, трассы, вулканические шлаки, биогенные кремнеземы, микрокремнезем, золы-уноса, доменные гранулированные шлаки, отвальные золошлаковые смеси, отсевы дробления бетонного

лома и др.), алюмосиликатного (галлуазит, бентонит, глиежи, цеолиты, метакаолин и др.), углерод-силикатного (шунгитосодержащие породы), кальций-магний-силикатного составов (волластонит, диопсид, серпентинит и др.) [6–9].

Известно, что минеральные наполнители вместе с цементным вяжущим участвуют в формировании микроструктуры матричной основы и контактных зон бетона. Структурообразование наполненного композита основывается на процессах, происходящих при контакте жидкой и твердой фаз, сопровождается локализацией внутренних дефектов (микротрещин, макропор, капиллярных пор), уменьшением их количества и размеров, снижением концентрации напряжений. В случае, когда поверхностная активность частиц наполнителя равна или выше поверхностной активности вяжущего, достигается повышение степени гидратации цемента и упрочнение межчастичных контактов. При условии, когда поверхностная активность наполнителя ниже поверхностной активности вяжущего, происходит упорядочение структуры и увеличение прочности композита за счет снижения межчастичных деформаций на поверхности раздела фаз [10].

Цель данной работы заключается в оценке

эффективности опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя на основе абиоморфного силицита по изменению прочности на сжатие тяжелого бетона (ТБ).

Абиоморфный силицит представляет собой рыхлую, слабо сцементированную, микропористую кремнистую осадочную породу, более чем на 50 % состоящую из опала (реакционно-активного аморфного кремнезема SiO₂·nH₂O с переменным содержанием воды), частично замещенного кристаллическими формами кремнезема (кристобалита, тридимита) с примесью кварца, полевых шпатов, глинистых минералов и др. [11].

Методика. При проведении исследования применялись следующие методы: рентгенофлуоресцентная спектрометрия на спектрометре ОР-ТІМ-Х, рентгенофазовый анализ на дифрактометре D8 Advance, сканирующая электронная микроскопия на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (химико-минеральный состав и микроструктура ОКТМН); лазерная гранулометрия на анализаторе Analysette 22 NanoTec Plus (гранулометрический состав, средний диаметр частиц, удельная поверхность ОКТМН); кондуктометрический экспресс-метод анализа гидратационной активности цемента на приборе ИАЦ-04М; стандартные методы испытаний подвижности бетонной смеси (по ГОСТ 10181-2014) и прочности на сжатие ТБ (по ГОСТ 26633-2015).

В качестве исходных сырьевых материалов использовались:

- цемент (II) ЦЕМ І 42,5Н по ГОСТ 31108-2016 (АО «Мальцовский портландцемент», холдинг «Евроцемент груп»), химического состава (% по массе): CaO 65,8, SiO₂ 21,8, Al₂O₃ 4,9, Fe₂O₃ 4,3, MgO 0,9, SO₃ 0,8, (Na₂O + K₂O) 0,66, минерального состава (% по массе): C₃S 63,5, C₂S 13,2, C₃A 5,8, C₄AF 13, удельной поверхности 340 м²/кг, нормальной густоты цементного теста 24 %;
- природный кварцевый песок (П) с модулем крупности 1,67 по ГОСТ 8736-2014 и гранитный щебень (Щ) фракции 5-20 мм по ГОСТ 8267-93 (АО «Национальная нерудная компания»);
- абиоморфный силицит трепел месторождения «Гришина Слобода» Брянской области (АО «АИП-Фосфаты») фракции 0,315-0,63 мм, истинной плотностью 2250 кг/м³, насыпной плотностью 860 кг/м³, общей пористостью 64 %, микропористостью 14 %.
- вода затворения, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Научно-практический интерес к использованию трепела вызван особенностями его структуры и свойств. Микропористая структура, обладающая высокой термохимической стабильностью и содержащая активные обменные катионы, предопределяет уникальные адсорбционные и катионообменные свойства трепела, имеющего способность к обратимому катионному обмену (восстановлению начальных сорбционных свойств) без разрушения кристаллической решетки [12]. При этом высокая пористость (50–70 %), низкие значения твердости (1–3), прочности (3–3,5 МПа), средней плотности (600–1400 кг/м³) обуславливают его использование в качестве абиоморфного силицитового сырья многоцелевого назначения.

В строительной отрасли более 75 % добытого трепела используется в качестве активной пуццолановой добавки для цементной промышленности [13], а около 24 % — в производстве теплоизоляционных строительных материалов и изделий [12, 14].

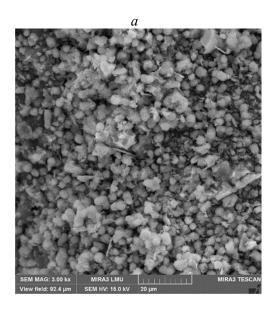
Получение ОКТМН проводилось диспергированием исходного абиоморфного силицита в течение 5-25 мин в механоактиваторах ударно-истирающего (в шаровой мельнице) и кавитационного (в ультразвуковом агрегате ПСБ-4035-04 с частотой ультразвука 35 кГц) типов действия.

Бетонные смеси (марка по подвижности П1) приготавливались следующим образом: загрузка в лабораторный бетоносмеситель принудительного действия щебня с 30 %-м расходом воды (для удаления пылеватых частиц); смешивание увлажненного Щ с песком; добавление портландцемента с предварительно введенным ОКТМН и остатка воды затворения; тщательное перемешивание массы до однородной смеси.

Состав тяжелого бетона проектировался методом ортогонального центрального трехфакторного математического планирования эксперимента с получением функции (уравнения регрессии) и номограмм отклика, связывающих прочность на сжатие ТБ через 28 суток нормального твердения (y_1) с варьируемыми факторами – расходом компонентов на 1 м³, кг: Ц (x_1) – 200–400, П (x_2) – 700–900, ОКТМН – 0–30 (при Щ, равном 1100 кг).

Основная часть. Результаты рентгенофлуоресцентной спектрометрии показали, что химический состав усредненной пробы ОКТМН представлен содержанием, (% по массе): CaO - 1,1; $SiO_2 - 78.7$; $Al_2O_3 - 9.4$; $Fe_2O_3 - 2.9$; MgO - 0.9; $SO_3 - 0.04$; $(Na_2O + K_2O) - 1.6$; $TiO_2 - 0.5$; MnO - 0,01; P₂O₅ - 0,3; потери при прокаливании – 4,4. При этом, по данным рентгенофазового анализа, минеральный ОКТМН включает в себя следующие фазы (% по массе): опал-кристобалит-тридимит – 54; кварц – 15; кальцит – 2; сидерит – 1; смектит (смешаннослойный глинистый минерал, сложенный неупорядоченным чередованием разбухающих монтмориллонитовых и неразбухающих слюдяных слоев) -15; слюда -10.

Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что микроструктура ОКТМН характеризуется наличием мельчайших разобщенных глобул опал-кристобалит-тридимита сферической морфологии, контактирующих со слоисто-чешуйчатыми частицами других минеральных фаз (рис. 1).



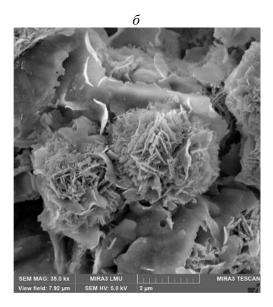


Рис. 1. Микроструктура частиц ОКТМН: a – увеличение в 3000 раз; δ – увеличение в 35000 раз

С целью изучения влияния способа и времени диспергирования абиоморфного силицита фракции 0,315–0,63 мм на изменение гранулометрического состава, удельной поверхности и среднего диаметра частиц ОКТМН были рассмотрены процессы его измельчения в механоактиваторах различных типов действия.

Известно, что диспергирование материала в шаровой мельнице происходит свободным ударом, в результате чего его разрушение производится по наиболее слабым связям и дефектам структуры в местах соединения кристаллов, зерен, слоев и др. В момент времени, когда структурная прочность каждой отдельной частицы достигает своего максимального предела, а ее масса становится ничтожно малой, свободный удар практически полностью заменяется на истирание. Крупные частицы, перемещаемые к стенкам мельницы, вытесняют более мелкие, которые, двигаясь от краев к центральной части, измельчаются исключительно в результате взаимного истирания в турбулентных потоках [5].

Диспергирование материала в интенсивном ультразвуковом поле, возбуждаемом в водной среде, объясняется эрозией (разрушением) его поверхности под действием кавитации — образования в воде пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром и газом. Данный процесс сопровождается микроударным воздействием при захлопывании образующихся пузырьков и возникающими при их пульсациях акустическими микропотоками. Кавитационные

пузырьки концентрируются на неровностях поверхности и в микротрещинах материала. Многократные гидравлические удары, возникающие при захлопывании пузырьков, вызывают локальное разрушение поверхности. Под действием акустических микропотоков вода проникает внутрь образовавшихся углублений, где разрушающее действие ударных волн становится еще более эффективным [15].

Выявлено, что гранулометрический состав ОКТМН, полученного в результате ударно-истирающего диспергирования абиоморфного силицита в шаровой мельнице, отличается бимодальным распределением частиц по размерам (рис. 2). При измельчении в течение 5 мин содержание частиц фракции 0,1–1 мкм составляет 1,41 %, 1–10 мкм – 31,49 %, 10–100 мкм – 46,28 %, более 100 мкм – 20,82 %, средний диаметр частиц – 94 мкм, удельная поверхность – 480 м 2 /кг.

Увеличение времени диспергирования от 5 до 25 мин приводит к повышению содержания в ОКТМН частиц фракции 0,1-1 мкм от 1,41 до 1,89 %, 1-10 мкм — от 31,49 до 49,53 %, 10-100 мкм — 46,28 до 47,86 %, а удельной поверхности — от 480 до 690 м²/кг. При этом доля частиц фракции более 100 мкм снижается от 20,82 до 0,72 %, средний диаметр — от 94 до 62 мкм. Наибольший прирост частиц фракций 0-1 мкм (на 19 %), 1-10 мкм (на 22 %), 10-100 мкм (на 7 %) и интенсивное возрастание величины удельной поверхности (на 18 %) происходит при

диспергировании абиоморфного силицита в интервале от 5 до 10 мин.

Сравнительный анализ показал, что гранулометрический состав ОКТМН, полученного в ультразвуковом агрегате, характеризуется одномодальным распределением частиц по размерам. После кавитационного диспергирования абиоморфного силицита в течение 5 мин средний диаметр частиц равен 4 мкм, а удельная поверхность $-880 \text{ м}^2/\text{кг}$. Содержание частиц фракции 0,1-1 мкм составляет 2,56%, 1-10 мкм -63,95%, 10-100 мкм -33,49%, более 100 мкм -0% (рис. 3).

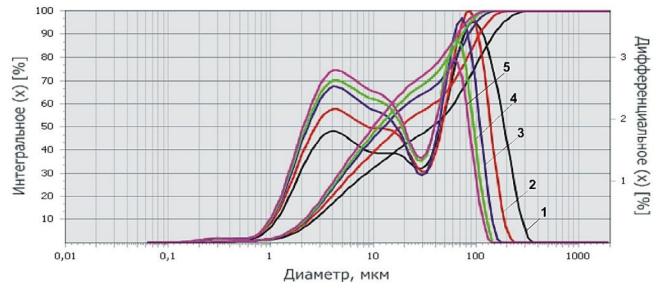


Рис. 2. Гранулометрический состав ОКТМН в зависимости от времени ударно-истирающего диспергирования: I-5 мин; 2-10 мин; 3-15 мин; 4-20 мин; 5-25 мин

При увеличении времени кавитационного диспергирования от 5 до 25 мин удельная поверхность ОКТМН повышается от 880 до 990 м 2 /кг, а доля частиц фракций 0,1–1 мкм, 1–10 мкм – от 2,56 до 2,93 %, от 63,95 до 73,62 % соответственно. Содержание частиц фракции 10–100

мкм снижается от 33,49 до 23,45 %, средний диаметр — практически не изменяется. Наибольший прирост частиц фракций 0,1—1 мкм (на 7 %), 1—10 мкм (на 9 %) и интенсивное возрастание величины удельной поверхности (на 7 %) достигаются также при диспергировании абиоморфного силицита в интервале 5—10 мин.

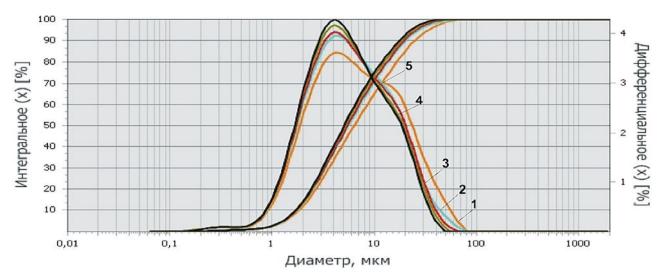


Рис. 3. Гранулометрический состав ОКТМН в зависимости от времени кавитационного диспергирования: I-5 мин; 2-10 мин; 3-15 мин; 4-20 мин; 5-25 мин

Механизм действия активных минеральных добавок в цементных системах обусловлен в основном их химическим взаимодействием с гидроксидом кальция Ca(OH)₂, образующимся в результате гидролиза трехкальциевого силиката

С₃S. При этом происходит кристаллизация, преимущественно, низкоосновных гидросиликатов кальция СSH (B), которые, увеличивая гелевую составляющую цементного камня, улучшают прочностные свойства бетона. Пуццолановый эффект действия высокодисперсных кремнеземистых добавок в цементных бетонах проявляется в химическом связывании Ca(OH)₂ активным кремнеземом в дополнительное количество СSH (В) и определяется наличием свободных реакционноспособных силанольных групп (≡SiOH) на поверхности частиц

$$\equiv$$
SiOH + Ca²⁺ \rightarrow \equiv SiOCa⁺ + H⁺; \equiv SiOH + Ca(OH)₂ \rightarrow \equiv SiOCaOH +H₂O; \equiv SiOCaOH \leftrightarrow \equiv SiOCa⁺ + OH⁻.

Известно, что ультра- и нанодисперсные кремнеземы заметно активнее влияют на концентрацию ионов Ca^{2+} и OH^- в наполняющей жидкой фазе цементной системы уже в первые минуты гидратации, что приводит к сокращению длительности индукционного периода (или он вовсе не наступает). В присутствии ультра- и наночастиц SiO_2 образование продуктов гидратации в ранний период происходит в непосредственной близости от их поверхности. При этом цементные зерна в меньшей степени блокируются новообразованиями, что способствует интенсификации процесса гидролиза и гидратации цементных фаз [16].

С учетом вышеизложенного, кондуктометрическим экспресс-методом анализа с помощью прибора ИАЦ-04М было исследовано влияние удельной поверхности (S_{ya}) опал-кристобалиттридимитового микронаполнителя, используе-

SiO₂, содержание которых зависит от их дисперсности [16]. На поверхности кремнезема в жидкой фазе системы «цемент — вода» происходит замена одного протона силанольной группы на ион кальция, что сопровождается протеканием реакций по следующим схемам:

мого в количестве 5 % (от массы Ц), на гидратационную активность (ГА) цемента (скорость изменения степени гидратации или концентрации новообразований во времени) через 40 с после смешивания с водой.

Данный метод основан на измерении величины удельной электрической проводимости водоцементного раствора (концентрации 0,03 г/мл), ее преобразовании в данные, соответствующие гидратационной активности цемента, и их цифровой индикации на дисплее электронного блока [17].

Выявлено, что изменение гидратационной активности цемента с содержанием ОКТМН носит экстремальный характер (рис. 4). При введении микронаполнителя с $S_{yд} = 480$ –690 м²/кг, полученного в шаровой мельнице, ГА повышается от 44,7 до 51,5–67,9 МПа, то есть на 15–52 % относительно исходного бездобавочного цемента с $S_{yд}$ 340 м²/кг.

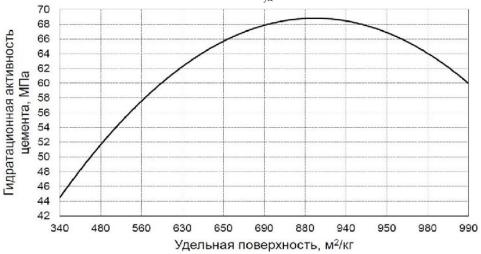


Рис. 4. Зависимость гидратационной активности цемента от удельной поверхности ОКТМН

Максимальное повышение ГА цемента (до 68,1-69 МПа, на 52-54 %) достигается при содержании ОКТМН с $S_{yg} = 880-900$ м²/кг, полученного в ультразвуковом агрегате. Данный результат, скорее всего, является следствием наиболее эффективного разрыва силоксановых связей и увеличения содержания реакционноспособных (по отношению к ионам Ca^{2+} и ОН в водоцементном растворе) силанольных групп (\equiv SiOH) на поверхности опал-кристобалит-тридимитовой фазы

микронаполнителя при кавитационном диспергировании.

Функция отклика прочности на сжатие тяжелого бетона через 28 суток нормального твердения с использованием ОКТМН ($S_{yx} = 880-900 \text{ м}^2/\text{кг}$) от заданных варьируемых факторов представлена следующим уравнением регрессии:

$$y_1 = 36,69 + 2,03 \cdot x_1 - 5,16 \cdot x_2 - 0,36 \cdot x_3 - 6,89 \cdot x_1^2 - 6,08 \cdot x_2^2 - 6,92 \cdot x_3^2 + 1,05 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1,2 \cdot x_2 \cdot x_3.$$
 (1)

Из уравнения (1) и номограмм (рис. 5) следует, что для получения ТБ с максимальным приростом прочности на сжатие наиболее оптимальным является состав, кг: Ц -300, $\Pi -750$,

IIIII - 1100, ОКТН – 15 при водоцементном отношении, равном 0,45.

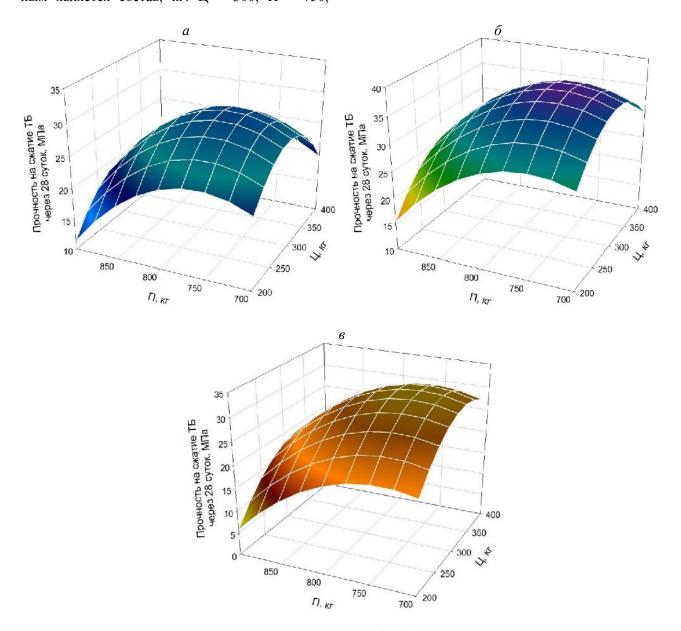


Рис. 5. Номограммы отклика прочности на сжатие тяжелого бетона через 28 суток твердения от варьируемых факторов: a – OKTMH = 0 кг; δ – OKTMH = 15 кг; ϵ – OKTMH = 30 кг

Эффективность опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя оценивалась в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56593-2015 «Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Методы испытаний» по формуле:

$$K = \frac{R_{OKTMH}}{R_0} \cdot 100, \tag{2}$$

где K — эффективность, %; R_{OKTMH} — проектная (марочная) прочность на сжатие бетона с микронаполнителем; R_0 — проектная (марочная) прочность на сжатие бетона без микронаполнителя.

Установлено, что при введении ОКТМН в количестве 5 % от массы цемента вязкость системы существенно не увеличивается, поэтому для обеспечения необходимой подвижности бетонной смеси не требуется дополнительного расхода воды затворения (табл. 1). В этом случае проектная (марочная) прочность на сжатие

бетона возрастает от 29,9 до 37,8 МПа, эффективность микронаполнителя составляет 126~%.

Использование ОКТМН в количестве от 5 до 10 % является малоэффективным (106 %) и

сопровождается увеличением водопотребности бетонной смеси, что влечет за собой снижение прочности на сжатие бетона от 37.8 до 31.7 МПа (на 16%).

Таблица 1 Результаты оценки эффективности опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя для тяжелого бетона

Состав бетонной смеси, кг/м ³			, кг/м ³	Расход воды для	Среднее значение про-	
цемент	песок	щебень	ОКТМН	получения бетонной смеси марки по подвижности П1, л/м ³	ектной (марочной) прочности на сжатие бетона, МПа	Эффективность <i>К</i> ОКТМН, %
300	750	1100	_	135	29,9	_
300	750	1100	15	135	37,8	126
300	750	1100	30	137	31,7	106

Выводы. В ходе проведения исследований выполнена оценка эффективности использования в тяжелом бетоне опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя, полученного диспергированием абиоморфного силицита - трепела месторождения «Гришина Слобода» Брянской области. Показан характер зависимости гранулометрического состава микронаполнителя от времени диспергирования в механоактиваторах ударно-истирающего и кавитационного типов действия. Выявлены оптимальные значения удельной поверхности ($880-900 \text{ м}^2/\text{кг}$) и дозировки (до 5 % от массы цемента) микронаполнителя, при которых достигается его максимальная эффективность с позиции повышения проектной (марочной) прочности на сжатие тяжелого бетона (до 126 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Баженов Ю.М., Фомичев В.Т., Ерофеев В.Т., Федосов С.В., Матвиевский А.А., Осипов А.К., Емельянов Д.В., Митина Е.А., Юдин П.В. Теоретическое обоснование получения бетонов на основе электрохимически- и электромагнитноактивированной воды затворения // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 2 (22). С. 4.
- 2. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Балатханова Э.М., Митина Е.А., Емельянов Д.В., Родин А.И., Карпушин С.Н. Получение и физико-механические свойства цементных композитов с применением наполнителей и воды затворения месторождений Чеченской Республики // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 141–151.
- 3. Лесовик В.С., Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е., Аксютин Ю.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 10–14.

- 4. Saidumov M.S., Murtazaev S-A.Yu., Khadisov V.Kh., Murtazaeva T.S-A., Abumuslimov A.S., Duskaev M.Z. Hydraulic Activity of Mineral Fillers of Manufacturing Origin Mixed with Cement // Atlantis Highlights in Materials Science and Technology. 2019. Vol. 1. Pp. 496–499.
- 5. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4 (37). С. 85–99.
- 6. Lukutsova N.P., Soboleva G.N., Golovin S.N., Chivikova E.V., Ogloblina E.V. Fine-Grained High-Strength Concrete // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 131–135.
- 7. Нгуен Дык Винь Куанг, Баженов Ю.М., Александрова О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокоэффективных бетонов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. №. 1. С. 102–117.
- 8. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Golovin S.N. Highly-Dispersed Wollastonite-Based Additive and its Effect on Fine Concrete Strength // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 1005–1011.
- 9. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов. М.: МГСУ, 2013. 204 с.
- 10. Балатханова Э.М., Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Митина Е.А., Родин А.И., Еремин А.В., Адамцевич А.О. Оптимизация состава цементных композитов с применением наполнителей месторождений Чеченской Республики // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 121–130.
- 11. Смирнов П.В. Фазовые переходы кремнезема в опал-кристобалитовых породах как фактор качества кремнистого сырья // Известия

Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 9. С. 6–15.

- 12. Пятко Ю.Н., Ахметова Р.Т., Хацринов А.И., Фахрутдинова В.Х., Ахметова А.Ю., Губай-дуллина А.М. Влияние ультразвуковой обработки на свойства трепела // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-2. С. 320–324.
- 13. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бикбаев Р.Р., Пиксайкина А.А. Исследование свойств портландцементов с активной минеральной добавкой на основе трепела // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2019. № 3. С. 7–17.
- 14. Ходырев В.М. Перспективы использования трепелов в производстве строительных материалов // Сухие строительные смеси. 2013. № 2.

C. 24-25.

- 15. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В., Моськина И.В. Структура и свойства наномодифицированного крупнопористого легкого бетона с кавитационно-обработанным заполнителем // Цемент и его применение. 2019. № 5. С. 52–56.
- 16. Брыков А.С., Камалиев Р.Т. Влияние кремнеземсодержащих добавок на гидратацию портландцемента в ранний период // Цемент и его применение. 2010. № 1. С. 146–148.
- 17. Головин В.В., Латышенко К.П., Цикунов В.С. Методы и приборы определения активности цемента // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 2. № 3 (17). С. 201–205.

Информация об авторах

Лукутцова Наталья Петровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных конструкций. E-mail: natluk58@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д. 3.

Пыкин Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных конструкций. E-mail: alexem87@yandex.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д. 3.

Чивикова Екатерина Владимировна, аспирант кафедры производства строительных конструкций. E-mail: yakovlev_yura72@mail.ru. Брянский государственный инженерно-технологический университет. Россия, 241037, Брянск, проспект Станке Димитрова, д. 3.

Поступила в декабре 2019 г. © Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В., 2020

*Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V. Bryansk State Engineering Technological University Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3 *E-mail: natluk58@mail.ru

USE OF OPAL-CRYSTOBALITE-TRIDIMITE MICRO-FILLER IN DENSE AGGREGATE CONCRETE

Abstract. Opal-cristobalite-tridimite micro-filler (OCTMF) as a component of dense aggregate concrete (DAC), obtained by grinding of sedimentary siliceous rock – abiomorphic silicite fractions of 0.31–0.63 mm was studied considered. The chemical-mineral composition and microstructure of the of OCTMF particles were determined. Comparative analysis of the relationship between particle size distribution, average particle diameter, specific surface area of OCTMF particle and grinding period in shock-abrasive and cavitation mills was carried out. The conductometric express method was applied to study the effect of the OCTMF specific surface area on hydration activity of cement system. The optimal value of OCTMF specific surface area was (880–900 m²/kg), achieved as a result of cavitation dispersion for 5–10 minutes, that provides increasing in t hydration activity of cement system by 52–54 %. The effect of the consumption of components on strength of the DAC after 28 days of hardening was determined using mathematical statistics method. That allows predicting this parameter by varying the component composition of the concrete mix. An assessment of the OCTMF efficiency was made. It was established, the maximal effect of the OCTMF is at concentration up to 5 % (by wt. of cement), that provides an increasing the design compressive strength of DAC up to 126 %.

Keywords: dense aggregate concrete, opal-cristobalite-tridymite microfiller, abiomorphic silicite, shockabrasive dispersion, cavitation dispersion, hydration activity, compressive strength.

REFERENCES

- 1. Bazhenov Yu.M., Fomichev V.T., Yerofeyev V.T., Fedosov S.V., Matvieskiy A.A., Osipov A.K., Emelyanov D.V., Mitina E.A., Yudin P.V. Theoretical justification of getting concrete based on electrochemically and electro-magnetically activated water for making concrete [Teoreticheskoe obosnovanie polucheniya betonov na osnove elektrohimicheski- i elektromagnitnoaktivirovannoj vody zatvoreniya]. Internet-Vestnik VolgGASU. 2012. No. 2 (22). Pp. 4. (rus)
- 2. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Balatkhanova E.M., Mitina E.A., Emelyanov D.V., Rodin A.I., Karpushin S.N. Obtaining and physical mechanical properties of cement composites with the use of fillers and mixing water from the Chechen Republic fields [Poluchenie i fiziko-mekhanicheskie svojstva cementnyh kompozitov s primeneniem napolnitelej i vody zatvoreniya mestorozhdenij CHechenskoj Respubliki]. Vestnik MGSU. 2014. No. 12. Pp. 141–151. (rus)
- 3. Lesovik V.S., Shakhova L.D., Kucherov D.E., Aksyutin Yu.S. Classification of active mineral additives for composite binders taking into account the Genesis [Klassifikaciya aktivnyh mineral'nyh dobavok dlya kompozicionnyh vyazhushchih s uchetom genezisa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 3. Pp. 10–14. (rus)
- 4. Saidumov M.S., Murtazaev S-A.Yu., Khadisov V.Kh., Murtazaeva T.S-A., Abumuslimov A.S., Duskaev M.Z. Hydraulic Activity of Mineral Fillers of Manufacturing Origin Mixed with Cement. Atlantis Highlights in Materials Science and Technology. 2019. Vol. 1. Pp. 496–499.
- 5. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S. Modern activation methods for binder and concrete mixtures (review) [Sovremennye sposoby aktivacii vyazhushchego i betonnyh smesej (obzor)]. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2018. No. 4 (37). Pp. 85–99. (rus)
- 6. Lukutsova N.P., Soboleva G.N., Golovin S.N., Chivikova E.V., Ogloblina E.V. Fine-Grained High-Strength Concrete. Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 131–135.
- 7. Nguyen Duc Vinh Quang, Bazhenov Yu.M., Aleksandrova O.V. Effect of quartz powder and mineral admixtures on the properties of high-performance concrete [Vliyanie kvarcevogo poroshka i mineral'nyh dobavok na svojstva vysokoeffektivnyh betonov]. Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14. No1. Pp. 102–117. (rus)
- 8. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Golovin S.N. Highly-Dispersed Wollastonite-Based Additive and its Effect on Fine Concrete Strength. Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 1005–1011.

- 9. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. Structure and properties of concrete with nanomodifiers based on technogenic waste [Struktura i svojstva betonov s nanomodifikatorami na osnove tekhnogennyh othodov]. Moscow: MGSU, 2013. 204 p. (rus)
- 10. Balatkhanova E.M., Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Mitina E.A., Rodin A.I., Eremin A.V., Adamtsevich A.O. ptimization of cement composites with the use of fillers from the Chechen Republic fields [Optimizaciya sostava cementnyh kompozitov s primeneniem napolnitelej mestorozhdenij CHechenskoj Respubliki]. Vestnik MGSU. 2014. No. 12. Pp. 121–130. (rus)
- 11. Smirnov P.V. Phase transitions of silica in opal-cristobalite rocks as a factor of quality of siliceous raw materials [Fazovye perekhody kremnezema v opal-kristobalitovyh porodah kak faktor kachestva kremnistogo syr'ya]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2017. Vol. 328. No. 9. Pp. 6–15. (rus)
- 12. Pyatko Y.N., Akhmetova R.T., Khatsrinov A.I., Fakhrutdinova V.K., Akhmetova A.Y., Gubaydullina A.M. Effect of ultrasonic treatment on the properties of Tripoli [Vliyanie ul'trazvukovoj obrabotki na svojstva trepela]. Fundamental Research. 2015. No. 12-2. Pp. 320–324. (rus)
- 13. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bikbaev R.R., Piksaykina A.A. Research of properties of Portland cement with active mineral additive on the basic of Tripoli [Issledovanie svojstv portlandcementov s aktivnoj mineral'noj dobavkoj na osnove trepela]. Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Materials. Constructions. Technologies". 2019. No. 3. Pp. 7–17. (rus)
- 14. Khodyrev V.M. Prospects of tripoli use in building materials manufacture [Perspektivy ispol'zovaniya trepelov v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. Suhie stroitel'nye smesi. 2013. No. 2. Pp. 24–25. (rus)
- 15. Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V., Moskina I.V. Structure and properties of nanomodified no-fines concrete with ultrasonic cavitation-treated aggregate [Struktura i svojstva nanomodificirovannogo krupnoporistogo legkogo betona s kavitacionno-obrabotannym zapolnitelem]. Cement and its Applications. 2019. No. 5. Pp. 52–56. (rus)
- 16. Brykov A.S., Kamaliev R.T. The effect of silica-containing additives on the hydration of Portland cement in the early period [Vliyanie kremnezemsoderzhashchih dobavok na gidrataciyu portlandcementa v rannij period]. Cement and its Applications. 2010. No. 1. Pp. 146–148. (rus)
- 17. Golovin V.V., Latyshenko K.P., Cikunov V.S. Methods and apparatus for determining the ac-

tivity of cement [Metody i pribory opredeleniya aktivnosti cementa]. Izvestiya MGTU "MAMI". 2013. Vol. 2. No 3 (17). Pp. 201–205. (rus)

Information about the author

Lukuttsova, Natalya P. DSc, Professor. E-mail: natluk58@mail.ru. Bryansk Technological University of Engineering. Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3.

Pykin, Alexey A. PhD, Assistant professor. E-mail: alexem87@yandex.ru. Bryansk Technological University of Engineering. Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3.

Chivikova, Ekaterina V. Postgraduate student. E-mail: aly-spodenejko@yandex.ru. Bryansk Technological University of Engineering. Russia, 241037, Bryansk, st. Stanke Dimitrova, 3.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Чивикова Е.В. Использование опал-кристобалит-тридимитового микронаполнителя в тяжелом бетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17

For citation:

Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Chivikova E.V. Use of opal-crystobalite-tridimite micro-filler in heavy concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-8-17.

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-18-25

*Вабищевич К.Ю., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Хозеев Е.О.

Иркутский национальный исследовательский технический университет *E-mail: Kristina-lebedev@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ РЕЗИНЫ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ВЯЖУЩЕГО В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ

Аннотация. На сегодняшний день одной из важных задач работников дорожного хозяйства является разработать и внедрить устойчивые к температурным перепадам и высоким техногенным нагрузкам дорожные покрытия. Так же необходимо, что б эти покрытия были экономически выгодны для производства. Так как известные способы улучшения физико-механических свойств вяжущего для асфальтобетона предполагают внедрение зачастую дорогостоящих зарубежных полимеров. Резиновая крошка, являясь отходом производства, позволяет решить проблему с утилизацией изношенных шин, соответственно и стоимость такого модификатора для дорожного битума в разы ниже, чем зарубежные полимеры. В статье рассмотрен пример использования резиновой крошки для модификации дорожного вяжущего в асфальтобетоне. Описаны составы битумно-резиновых суспензий, определение физико-механических свойств модифицированного вяжущего. Приведены результаты испытаний асфальтобетона с битумно-резиновым вяжущим. Проведен сравнительный анализ асфальтобетона на битуме нефтяном дорожном вязком и асфальтобетоне на модифицированном вяжущем. Целью данной работы является разработка теоретического обоснования и практического применения битумно-резинового вяжущего, получаемого совмещением битума нефтяного дорожного с резиновой крошкой. Обработка материалов происходила в поле СВЧ. Битумно-резиновый композит получаемый смешением битума нефтяного, резиновой крошки, нефтяного пека и нефтяного мазута, и обработанного в поле СВЧ, превосходит по физико-механическим свойствам битум нефтяной дорожный вязкий БНД 100/130.

Ключевые слова: битум, резиновая крошка, физико-механические свойства, нефтяной пек, нефтяной мазут.

Введение. В процессе производственной и бытовой деятельности человека образуется большое количество отходов, в частности, полимеров [1]. Полимеры – это высокомолекулярные соединения, имеющие различные химические составы и структуры. К полимерам относятся термопласты, термоэластопласты, эластомеры (каучукоподобные и каучуки). Существующие технологии использования вторичного резинового сырья решают проблему конкретного производства, а бытовые отходы эластомеров остаются без внимания. На севере России большая проблема переработки изношенных шин автомобилей [2]. Вывозят изношенные шины автомобилей в отработанные карьеры для захоронения. Где резина в процессе старения разрушается, соответственно происходит загрязнение окружающей среды [3]. Для снижения экологической нагрузки необходимы комплексные подходы переработки резинотехнических отходов и техногенного резинового сырья (автомобильных шин), разработка новых эклогически чистых технологических процессов [4]. Изношенные автомобильные покрышки – отходы сферы потребления. Основным продуктом переработки покрышек является резиновая крошка [5].

Материалы и методология. Исходными материалами для приготовления вяжущего использовались резиновая крошка фракции 2,5 мм,

нефтяной пек, нефтяной мазут и битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 100/130. Физикомеханические свойства вяжущего определяли на приборах: температуру размягчения на приборе КиШ-20М4, температуру хрупкости на АТХ-20, растяжимость на ДБ-2М, адгезию к каменным материалам с помощью емкости объемом 1000 мл и штатива. Для приготовления асфальтобетона тип Б марки II использовались минеральные материалы: щебень из гравия карьер «Иркутный» фракции от 5 до 10 мм и св. 10 до 20 мм, песок из отсевов дробления карьер «Иркутный» крупный класс II, минеральный порошок из карбонатных горных пород карьера «Перевал». Формование образцов асфальтобетона производилось на прессе ИП-1А-500АБ, ф форме диаметром 71,5 мм. Физико-механические свойства асфальтобетона измерялись на приборах: на прессе ДТС-06-50 предел прочности при сжатии при температурах 20 °C, 50 °C и 0 °C, определение предела прочности водонасыщенных образцов; при определении средней плотности и водонасыщении использовались весы лабораторные электронные ВЛТЭ-2100/5100, емкость объемом 20 литров.

Основная часть. На первом этапе изготовлено модифицированное вяжущее для асфальтобетона. Изначально изготавливаем 5 составов вяжущего с разными содержаниями резиновой

крошки, нефтяного пека и мазута. В битум, нагретый до жидкого состояния в сушильном шкафу при температуре 150 °C, добавляем резиновую крошку, нефтяной пек и нефтяной мазут.

Компоненты дозировались в процентах от содержания битума, битум принимаем за 100 %. Соотношение компонентов в процентах приведено в таблице 1.

Таблица 1

Соотношения компонентов

№п/п	Компоненты	Номера составов							
14511/11	компоненты	1	2	3	4	5	6		
1	Битум	100	100	100	100	100	100		
2	Резиновая крошка	1	2	3	4	5	6		
3	Нефтяной мазут	2	3	4	5	6	7		
4	Нефтяной пек	5	10	15	20	25	30		

Смешение компонентов осуществляется в герметичном реакторе под воздействием СВЧ излучения с постоянным перемешиванием. Образующиеся в процессе газы, поступают в теплообменник, и отводятся в приёмную ёмкость. [6] Смешивание проводилось в течение 2 часов при

температуре 185 °C. Далее составы были дополнительно обработаны на высокоскоростном диспергаторе в течении 10 минут при температуре 160 °C. Результаты по определению физико-механических свойств вяжущего приведены в таблице 2.

Таблица 2 Результаты физико-механических испытаний вяжущего

№п/п	Наименование	Номер состава	Показ	атели		
JN211/11	показателя	помер состава	Единичное значение	Среднее значение		
			+46,5			
		1	+46,6	+46,6		
			+46,6			
			+47,8			
		2	+47,8	+47,8		
			+47,7			
	Томиченостине		+48,0			
1	Температура размягчения, °С	3	+48,3	+48,2		
	размягчения, С		+48,2			
			+50,0			
		4	+50,2	+50,1		
			+50,0			
			+50,2			
		5	+50,1	+50,2		
			+50,2			
			-20,0			
		1	-20,1	-20,0		
			-20,0			
			-21,0			
		2	-20,9	-21,0		
			-21,0			
	Томиополите		-21,0			
2	Температура хрупкости, °С	3	-21,1	-21,1		
	хрупкости, С		-21,1			
			-21,7			
		4	-21,8	-21,8		
			-21,7			
			-22,0			
		5	-22,1	-22,0		
			-22,0			

окончание	таолицы	4

				OKON tantae maositiqui 2
		1	3,9 4,0 4,0	4,0
3		2	4,3 4,3 4,2	4,3
	Растяжимость при 0 °C, см	3	4,5 4,6 4,4	4,5
		4	4,5 4,6 4,6	4,6
		5	4,8 4,9 4,9	4,9

Результаты испытаний на адгезию к каменным материалам, таким как гранит, базальт и щебень из гравия, составы N = 1 и N = 2 не выдержали к граниту, остальные все составы ко всем каменным материалам испытание выдержали.

По результатам, приведенным в таблице 2 можно сделать выводы, что составы №4 и №5 по своему содержанию однородны, резиновая крошка растворилась, что говорит о высоких физико-механических результатах испытаний, высокая температура размягчения, низкая температура хрупкости и достаточно хорошая растяжимость. Составы №4 и №5 выбраны в качестве вяжущего для асфальтобетона.

На втором этапе произведен замес асфальтобетона тип Б марка II на вяжущих №4 и №5, а также один состав на битуме БНД 100/130 в качестве эталонного образца. Состав асфальтобетона: щебень из гравия фракции св. 10 до 20 мм -22 %, щебень из гравия фракции от 5 до 10 мм -21 %, песок из отсевов дробления -52 %, минеральный

порошок -5 %, вяжущее -5.7 %. Минеральные материалы изначально высушены до постоянной массы. После точного дозирования щебень из гравия и песок из отсевов дробления помещены в сушильный шкаф на 2 часа при температуре 165 °C, вяжущее нагревалось отдельно 1,5 часа при температуре 140 °C. Далее на горячую смесь щебня из гравия и песка из отсевов дробления, высыпали минеральный порошок и налили вяжущее. Затем смесь грелась в сушильном шкафу 1 час при температуре 150 °C периодически через каждые 15 минут перемешиваясь. Далее из смеси формовали образцы диаметром 71,5 мм. Образцы перед испытаниями выдержали на воздухе при комнатной температуре 1 сутки. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 12801-98. Результаты испытания асфальтобетона приведены в таблице 3. Состав №1 – на битуме БНД 100/130, состав №2 – на вяжущем №4, состав №3 – на вяжущем №5.

Таблица 3 Результаты физико-механических результатов испытаний асфальтобетона

№п/п	Наименование	Номер состава	Показатели			
JN≌11/11	показателя	помер состава	Единичное значение	Среднее значение		
	Предел прочности при					
	сжатии, МПа при тем-					
	пературе:					
			2,58			
		1	2,59	2,59		
1			2,59			
l I			2,58			
	20 °C	2	2,58	2,58		
			2,59			
			2,64			
		3	2,65	2,65		
			2,65			

			np	оодолжение таблицы 3		
			1,27			
		1	1,28	1,28		
			1,28			
			1,34			
	50 °C	2	1,32	1,33		
		_	1,33	-,		
			1,54			
		3	1,55	1,55		
		3	1,55	1,33		
			1,33			
		,	8,01	0.00		
		1	8,00	8,00		
			8,00			
			7,59			
	0 °C	2	7,57	7,58		
			7,58			
			8,00			
		3	8,03	8,02		
			8,02	ŕ		
			2,53			
		1	2,55	2,54		
		1	2,54	2,54		
			2,54			
	20.00	2	2,59	2.60		
20 _B °	20 _B °C	2	2,60	2,60		
			2,60			
			2,83			
		3	2,82	2,83		
			2,83			
			2,41			
		1	2,40	2,40		
			2,40	,		
			2,47			
	20 _{дл} °С	2	2,47	2,48		
	20дл С		2,49			
			2,49			
		2	2,59	2.60		
		3	2,60	2,60		
			2,60			
			2,36			
		1	2,36	2,36		
			2,35			
	C=====================================		2,37			
2	Средняя плотность, г/см ³	2	2,37	2,37		
	1/CM ³		2,37			
			2,38			
		3	2,37	2,38		
			2,38	2,50		
			3,03			
		1		2.02		
		1	3,02	3,02		
			3,00			
	Водонасыщение,		2,98			
3	% по объему	2	2,97	2,97		
	, o no cobeing		2,95			
			2,83			
		3	2,85	2,83		
			2,82	,		
			0,98			
4	Коэффициент	1	0,98	0,98		
4	водостойкости	1		0,90		
	1	1	0,98			

				окончание таблицы 3	
			1,00		
		2	1,01	1,00	
			1,00		
			1,07		
		3	1,06	1,07	
			1,07		
			0,93		
		1	0,93	0,93	
			0,93		
	Коэффициент		0,96	0,96	
5	водостойкости	2	0,96		
	при длительном водонасыщении		0,96		
	,		0,98		
		3	0,98	0,98	
			0,98		

Данные представленные в таблице 3 показывают положительное влияние модифицированного вяжущего на физико-механические свойства асфальтобетона [7]. Состав с вяжущим №5, где наибольшее содержание резиновой крошки, показал более высокие показатели. Плотность выше, чем у состава на битуме БНД 100/130, показатели водостойкости, как при длительном, так и при простом водонасыщении так же выше. Водонасыщение меньше, что говорит о меньшем содержании пор и более плотном составе. Предел прочности на сжатие при температуре 50 °C высокий, что говорит о теплостойкости асфальтобетона, предел прочности на сжатие при 0 °C показывает высокую трещиностойкость в зимний период. Так же дополнительно смеси были исследованы на адгезию. Полученные результаты показали отличную адгезию по 5 шкале на 5 баллов состав №3 на вяжущем с максимальным содержанием резиновой крошки и состав №2, на 4 балла состав №1.

Выводы. Проведенные в работе исследования показывают, что добавление резиновой крошки в битум, позволяет повысить его физикомеханические свойства, такие как температура размягчения, температура хрупкости и растяжимость [8]. Получается вяжущее, которое является практически аналогом полимебитумного вяжущего, только с использованием отходов резины. Установлено, что асфальтобетон на модифицированном вяжущем позволяет повысить физико-механические свойства, такие как водостойкость, плотность, предел прочности при сжатии при температурах 20 °C, 0 °C, 50 °C, понизить водонасыщение [9]. Изношенные шины это эластомерный материал с уникальными свойствами.

Производство резиновых изделий, а именно автомобильных шин увеличивается с каждым годом, соответственно растут отходы, что неблагоприятно влияет на окружающую среду [10]. Резиновая крошка, получаемая из отходов резины, является уникальным модификатором вяжущего для асфальтобетона. Так как по сравнению с каучуками более устойчива к окислительному воздействию кислорода воздуха, обладает высокой устойчивостью к солевым растворам и воде. В своем составе резиновая крошка содержит полимеры, пластификаторы и антиоксиданты, благодаря им повышается устойчивость вяжущего в условиях эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Коновалов Н.П. Применение СВЧ-энергии для переработки угля и отходов резины в жидкие продукты: диссертация док. тех. наук. М., 2001. С. 150–155.
- 2. Акимов А.Е. Повышение качества асфальтобетона путем обработки битума полем сверхвысокой частоты: диссертация канд. техн. наук. Б., 2010. С. 53–58.
- 3. Окресса Э. СВЧ-энергетика. М.: Изд-во Мир, 2009. 463 с.
- 4. Месяц Л.Д. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Изд-во Радио, 2010. 256 с.
- 5. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Изд-во Наука; 2012. 143 с.
- 6. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических

процессов. С.: Изд-во Саратовского ун-та. 2014. 140 с.

- 7. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. М.: Изд-во Наука. 2013. 336 с.
- 8. Potyondy D.O. Geosystem Engineering. Engineering. 2015. Vol. 23. Pp. 131–139.
- 9. Zhang D., Whiten W. Powder Technology. Concrete. 2010. Vol. 9. Pp 205–212.
- 10.Mullahmetov N.R., Kemalov A.F., Kemalov R.A., Kostromin R.N. Modification of road bitumen with rubber // Rubber. 2005. Vol 12. Pp 123–129.
- 11. Yamashita K., Nagai M. // Materials science. 2012. Vol. 32. Pp. 124–129.
- 12.Chiu R.C., Garino T.J. // Ceramic materials. 2014. Vol.76. Pp. 222–234.
- 13.Котов Ю.А., Осипов В.В., Иванов М.Т. Модифицированные битумы. М.: Изд-во ЖТФ. 2015. С. 76.
- 14. Цодиков М.В., Передерий М.А., Карасева М.С. Применение полимербитумных вяжущих. Российские нанотехнологии. 2007. № 1. С. 153—155.

15.Цодиков М.В., Передерий М.А., Карасева М.С. Резино-битумные вяжущие // Наукоемкие технологии. 2007. № 4. С. 49–57.

16.Носов В.П. Увеличение сроков службы дорожных одежд – стратегическая задача дорожной науки // Автомобильные дороги. 2006. № 12. С. 81–86.

17. Соломенцев А.Б. Классификация и номенклатура модифицирующих добавок для битумов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2008. \mathbb{N} 1. С. 14–16.

18. Capitão S.D. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 36. Pp. 1016–1024.

19.Железко Т.В. Структура и свойства асфальтовяжущих // Изв. вузов. Строительство. 2016. №3. С. 35–42.

20. Руденский А.В. Повышение долговечности асфальтобетонов введением активного комплексного модификатора // Строительные материалы. 2011. № 10. С. 10–11.

Информация об авторах

Вабищевич Кристина Юрьевна, аспирант кафедры автомобильных дорог. E-mail: Kristina-lebedev@mail.ru. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д.83.

Коновалов Николай Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры физики. E-mail: knp@istu.edu. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д.83.

Коновалов Петр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры физики. E-mail: i03@istu.edu. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д.83.

Хозеев Евгений Олегович, аспирант кафедры автомобильных дорог. E-mail: khozeev1987@mail.ru. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д.83

Поступила в октябре 2019 г.

© Вабищевич К.Ю., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Хозеев Е.О., 2020

*Vabishchevich K.Yu., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Hoseev E.O.

Irkutsk National Research Technical University *E-mail: Kristina-lebedev@mail.ru

USE OF RUBBER WASTE TO MODIFY THE BINDER IN ASPHALT CONCRETE

Abstract. The development and implementation of road surfaces resistant to temperature extremes and high technogenic loads is one of the important tasks for road workers. These surfaces must be economically viable for production. Since the known methods for improving the physicomechanical properties of a binder for asphalt concrete involve the introduction of expensive foreign polymers. Rubber crumb, being a waste of production, allows to solve the problem with the disposal of used tires, and the cost of such a modifier for road bitumen is lower than foreign polymers. The article describes an example of using a rubber crumb to modify the road binder in asphalt concrete. The compositions of bitumen-rubber suspensions, the determination of the physicomechanical properties of a modified binder are described. The test results of asphalt concrete with a bitumen-rubber binder are given. A comparative analysis of asphalt concrete on bitumen oil road viscous and asphalt concrete on a modified binder is carried out. The purpose of this work is to develop a theoretical justification and practical application of a bituminous-rubber binder obtained by combining oil road bitumen

with rubber crumb. Material processing takes place in the microwave field. The resulting bitumen-rubber composite surpasses viscous petroleum bitumen in physical and mechanical properties and is suitable for use as a binder for the production of high-quality asphalt concrete.

Keywords: bitumen, crumb rubber, physical and mechanical properties, oil pitch, oil fuel.

REFERENCES

- 1. Konovalov N.P. Application of microwave energy for processing coal and rubber waste into liquid products [Primenenie SVCH-energii dlya pererabotki uglya i othodov reziny v zhidkie produkty]: dis. doc. those. sciences. Moscow, 2001. Pp. 150–155.
- 2. Akimov A.E. Improving the quality of asphalt concrete by treating bitumen with an ultra-high frequency field [Povyshenie kachestva asfal'tobetona putem obrabotki bituma polem sverhvysokoj chastoty]: dis., cand. tech. sciences. Belgorod, 2010. Pp. 53–58
- 3. Okressa E. Microwave energy [SVCH–energetika]. Moscow: Mir Publishing House, 2009. 463 p.(rus)
- 4. Month L.D. The generation of powerful nanosecond pulses [Generirovanie moshchnyh nanosekundnyh impul'sov]. Moscow: Radio Publishing House, 2010. 256 p. (rus)
- 5. Nikolsky V.V. Electrodynamics and radio wave propagation [Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln]. Moscow: Science Publishing House; 2012.143 p.(rus)
- 6. Arkhangelsk Yu.S., Devyatkin I.I. Microwave heating installations for the intensification of technological processes [Sverhvysokochastotnye nagrevatel'nye ustanovki dlya intensifikacii tekhnologicheskih processov]. Saratov: Publishing house of Saratov University. 2014.140 p. (rus)
- 7. Dukhin S.S., Deryagin B.V. Electrophoresis [Elektroforez]. Moscow: Publishing House of Science. 2013.336 p.(rus)
- 8. Potyondy D.O. Geosystem Engineering. Engineering. 2015. Vol. 23. Pp. 131–139.
- 9. Zhang D., Whiten W. Powder Technology. Concrete. 2010. Vol. 9. Pp. 205–212.
- 10.Mullahmetov N.R., Kemalov A.F., Kemalov R.A., Kostromin R. N. Modification of road bitumen with rubber. Rubber. 2005. Vol 12. Pp. 123–129.

- 11. Yamashita K., Nagai M. Materials science. 2012. Vol. 32. Pp. 124–129.
- 12.Chiu R.C., Garino T.J. Ceramic materials. 2014. Vol. 76. Pp. 222–234.
- 13.Kotov Yu.A., Osipov V.V., Ivanov M.T. Modified bitumen [Modificirovannye bitumy]. Moscow: Publishing house ZhTF. 2015. P. 76.(rus)
- 14.Tsodikov M.V., Perederiy M.A., Karaseva M.S. The use of polymer bitumen binders [Primenenie polimerbitumnyh vyazhushchih]. Russian Nanotechnology. 2007. No. 1. Pp. 153–155.(rus)
- 15.Tsodikov M.V., Perederii M.A., Karaseva M.S. Rubber-bitumen binders [Rezino-bitumnye vyazhushchie]. High technology. 2007. No. 4. Pp. 49–57.(rus)
- 16.Nosov V.P. Increasing the service life of pavements is a strategic task of road science [Uvelichenie srokov sluzhby dorozhnyh odezhd strategicheskaya zadacha dorozhnoj nauki]. Highways. 2006. No. 12. Pp. 81–86.(rus)
- 17. Solomentsev A.B. Classification and nomenclature of modifying additives for bitumen [Klassifikaciya i nomenklatura modificiruyushchih dobavok dlya bitumov]. Science and technology in the road industry. 2008. No. 1. Pp. 14–16. (rus)
- 18. Capitão S. D. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. Construction and Building Materials. 2012. Vol. 36. Pp. 1016-1024.
- 19.Zhelezko T.V. The structure and properties of asphalt binders [Struktura i svojstva asfal'tovyazhushchih]. Izv. universities. Construction. 2016. No3. Pp. 35–42.(rus)
- 20. Rudensky A.V. Increasing the durability of asphalt concrete by the introduction of an active complex modifier [Povyshenie dolgovechnosti asfal'tobetonov vvedeniem aktivnogo kompleksnogo modifikatora]. Building materials. 2011. No. 10. Pp. 10–11. (rus)

Information about the authors

Vabishchevich, Kristina Yu. Postgraduate student. E-mail: Kristina-lebedev@mail.ru. Irkutsk National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, ul. Lermontova, d. 83

Konovalov, Nikolaj P. DSc, Professor. E-mail: knp@istu.edu. Irkutsk National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, ul. Lermontova, d. 83

Konovalov, Petr N. PhD, Assistant professor. E-mail: i03@istu.edu. Irkutsk National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, ul. Lermontova, d. 83

Hozeev, Evgenij O. Postgraduate student. E-mail: Kristina-lebedev@mail.ru. Irkutsk National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, ul. Lermontova, d. 83

Received in October 2019

Для цитирования:

Вабищевич К.Ю., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Хозеев Е.О. Использование отходов резины для модификации вяжущего в асфальтобетоне // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 18–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-18-25

For citation:

Vabishchevich K.Yu., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Hoseev E.O. Use of rubber waste to modify the binder in asphalt concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 18–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-18-25

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-26-33

*Алшахван А., Калгин Ю.И.

Воронежский государственный технический университет *E-mail: alaaalaash@yahoo.com

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В УСЛОВИЯХ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Аннотация. Вследствие длительных военных действий в Сирийской Арабской Республике долгое время не выполнялись работы по содержанию и ремонту автомобильных дорог, что привело к упадку дорожной сети. Автомобильные дороги и улично-дорожная сеть Сирийской Арабской Республики требуют значительного восстановления и необходимости выполнения дорожно-ремонтных работ в течение короткого периода времени с наименьшими затратами при достижении оптимальных технических характеристик. Слабый экономический потенциал страны, низкие запасы топлива различного типа, помимо огромного разрушения дорожной сети, — вот основные трудности, стоящие перед специалистами в процессе восстановления. Данная статья посвящена исследованию технологий приготовления асфальтобетонных смесей, используемых в дорожном строительстве, и определению наиболее подходящей технологии для современных условий страны. В результате исследований было выявлено, что теплая асфальтобетонная смесь является лучшим выбором по сравнению с другими типами технологий, поскольку она снижает потребление энергии и производственные затраты, помогает продлить строительный сезон, расширить производственные мощности, сохранить окружающую среду и др.

Ключевые слова: Сирийская Арабская Республика, асфальтобетон, теплая асфальтобетонная смесь, восстановление дорог, парниковый газ.

Введение. В отчете, опубликованном 10 июля 2017 года, Всемирный банк оценил общие потери сирийской экономики в 226 миллиардов долларов из-за продолжающегося кризиса в стране [1], который длится уже более шести лет. Военные действия привели к большим жертвам и разрушению инфраструктуры.

Сирийская экономика понесла большие убытки вследствие разрушения дорог, зданий, мостов, инфраструктуры и т. д. Согласно отчету, были разрушены или частично повреждены около 27 % всех жилых зданий и около 44 % дорожной сети Сирийской Арабской Республики (САР) [1].

В САР автомобильный транспорт является важнейшим видом, поскольку через него осуществляется более 80 % перевозки людей, товаров и транспортных средств, что делает дорожную сеть республики нервом экономической и социальной жизни [2, 3, 4].

В течение последних восьми лет (с 2011 г.) вследствие сложных военно-политических и климатических условий, отсутствия периодического обслуживания и надзора были повреждены большие участки дорожной сети САР, что привело к многократному увеличению потребности в строительных работах, связанных с восстановлением (ремонтом или капитальным ремонтом) существующих автомобильных дорог и строительством новых.

В настоящее время асфальтобетонное покрытие из горячих смесей является наиболее распространенным покрытием в дорожном строительстве большинства регионов мира [5, 6]. Оно используется при строительстве дорог общего пользования внутри и за пределами городов [5]. Например, в Сирийской Арабской Республике с использованием данного типа покрытия построено около 95 % всех дорог [4]. Однако само производство горячей асфальтобетонной смеси является весьма дорогостоящим, а ее использование сопровождается многими эксплуатационными, техническими и экологическими проблемами. Вследствие этого поиск альтернативы горячим асфальтобетонным смесям является насущной научной и практической потребностью в дорожной отрасли САР.

Методология. При проведении исследования проанализированы проблемы дорожной сети в целом и проблемы, вытекающие из нынешних условий. Были рассмотрены характеристики асфальтобетонных смесей, используемых при строительстве дорог: горячие, холодные и теплые асфальтобетонные смеси с целью определения наиболее подходящих асфальтобетонных смесей для использования при техническом обслуживании и восстановлении дорог в современных условиях САР.

1. Проблемы дорожной сети в Сирии. Автомобильный транспорт в Сирии составляет более 80 % общего объема транспорта, включая

воздушный, водный и железнодорожный транспорт [7, 8]. Коммерческий и общественный транспорт в основном используется на междугородних перевозках, в уличных сетях и на сельских дорогах. Поэтому улучшение состояния дорожной сети напрямую повлияет на улучшение различных аспектов жизни граждан.

Дорожная сеть Сирии включает несколько типов дорог, которые обычно классифицируются на три основные группы: магистрали, двусторонние дороги и односторонние дороги. На рис. 1 показаны изменения протяжённости различных типов дорожных сетей в Сирии.

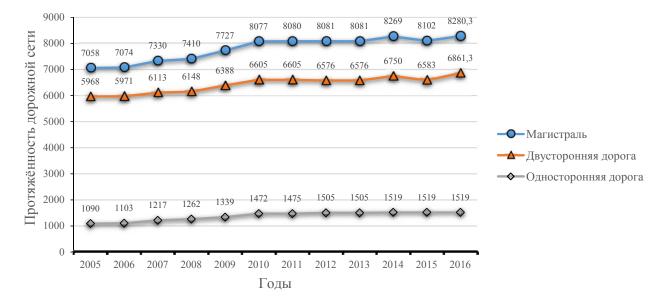


Рис. 1. Протяжённость дорожной сети в Сирии (км) за 2005–2016 гг. [9]

Дорожные покрытия больших участков дорожной сети в Сирии были построены с использованием горячих асфальтобетонных смесей. Этот тип асфальтобетонных смесей имеет много технических проблем (трещины, колеи, эрозия, старение и др.), которые в основном возникают вследствие климатических условий региона, высоких температур и интенсивных транспортных нагрузок.

Военные действия, которые непрерывно ведутся в Сирии более восьми лет, привели к разрушению значительной части дорожной сети, которая нуждается в восстановлении, реконструкции и техническом обслуживании (рис.2). В связи с этим многократно возрастают объемы дорожных работ, которые требуют большого количества строительных материалов и топлива для обеспечения производственного процесса. В данной ситуации необходимо осуществить строительство большого количества новых асфальтобетонных заводов для обслуживания различных участков дорожной сети, которые, в случае использования традиционных горячих асфальтобетонных смесей, должны быть расположены близко к строящимся дорожным объектам.

Все это приводит к необходимости поиска новых технологий дорожного строительства, которые, отвечая предъявляемым техническим и

эксплуатационным требованиям, потребовали бы минимальных затрат дорожно-строительных материалов и топлива, снижали выбросы парниковых газов, а также увеличивали расстояние транспортировки смеси до объекта, что актуально как для уличной дорожной сети, так и для междугородних дорог.

2. Наиболее подходящая асфальтобетонная смесь для использования в условиях Сирийской Арабской Республики. Понимание вредных и опасных последствий изменения климата и окружающей среды заставило представителей всех отраслей индустрии пересмотреть методы производства, чтобы минимизировать выбросы парниковых газов (ПГ). Асфальтовая промышленность способствует увеличению выбросов СО2 в связи с потребностью в энергии на этапе производства [14]. Горячая асфальтобетонная смесь (ГАС) является доминирующим типом среди производимых асфальтобетонных смесей. Производство ГАС проходит в несколько этапов, включая сушку и нагрев инертных минеральных материалов, нагрев вяжущего и смешивание всех компонентов. Конечная температура перемешивания асфальтобетонной смеси обычно составляет около 165 °C [15].







Рис. 2. Состояние дорог в Сирии после военных действий: а – г. Алеппо [10]; б – г. Алеппо [11]; в – г. Дамаск [12]; г – г. Хомс [13]

Горячие асфальтобетонные смеси - это смеси с температурой смешивания в интервале 145-160 °C, а также температурой их укладки и уплотнения не менее 120-130 °C [15, 16]. При таких повышенных температурах потребляется значительное количество энергии, а в атмосферу выбрасывается большое количество парниковых газов и загрязняющих веществ [16]. Интервал времени между выпуском смеси из смесителя и её уплотнением должен быть весьма коротким, что диктует необходимость расположения производственных центров на участках выполнения работ или в непосредственной близости от них с целью сокращения расстояния транспортировки смеси и недопущения её повторного нагрева для достижения необходимой температуры уплотнения. Большая часть существующих ныне дорог в Сирии создана с использованием энергозатратной технологии производства ГАС [4].

В связи с существующей тенденцией к сокращению потребления топлива и энергии и, следовательно, к снижению экономических затрат, а также в связи с соблюдением экологических норм и необходимостью продления расстояния транспортировки и строительного сезона, указанный вид асфальтобетонных смесей не представляется наиболее перспективным для использования в современных дорожных условиях Сирии.

Холодные асфальтобетонные смеси, укладываемые в холодном состоянии благодаря применению в них жидких битумов и существенному снижению количества вяжущего материала, в сравнении с горячим и теплым асфальтобетонами, способны длительное время оставаться рыхлыми. Эта особенность холодных асфальтобетонных смесей дает возможность заготавливать их впрок (они могут храниться в штабелях или упакованном виде до 6 мес.) [16, 17, 18]. Однако, недостатком этого вида смеси является длительный период формирования в покрытии (1,5 – 3 мес. в зависимости от вязкости жидкого битума, интенсивности движения автомобилей и погодных условий) [17, 19]. Вследствие недостаточной плотности и слабых структурных связей холодный асфальтобетон характеризуется низкой водо- и морозостойкостью, поэтому его применяют в условиях холодного климата на дорогах низких категорий или для их ремонта в переходные периоды года [15, 18, 19]. Холодные асфальтобетонные смеси непригодны для строительства дорожного покрытия в условиях средиземноморского, субтропического, а ближе к центру страны – континентального климата Сирии, в которой летняя температура в пустынных областях доходит до + 50 °C [20].

Теплая асфальтобетонная смесь (TAC) – это технический термин, используемый для описания асфальтобетонных смесей, производимых

при температурах ниже традиционных ГАС обычно на 10-40 °C [21].

Преимущества технологий ТАС заключаются в том, что снижение температуры производства асфальтобетонной смеси гарантирует экономические и экологические выгоды. Чем ниже температура смешивания, тем меньше выбросы парниковых газов и расход топлива. Многие исследования продемонстрировали преимущества технологий ТАС. К ним относятся снижение выбросов СО2 и расхода топлива, увеличение срока службы дорожного покрытия вследствие уменьшения старения органического вяжущего на этапе производства асфальтобетонной смеси, возможность включения в смесь повышенного содержания переработанного асфальтобетона, улучшение условий труда на асфальтовых заводах и увеличение времени на транспортировку, укладку и уплотнение асфальтобетонных смесей [22-23]. Технологии ТАС могут снизить выбросы парниковых газов примерно на 33 % по сравнению с ГАС, а потребление энергии на этапе производства – примерно на 18 % [24, 25].

Технология теплых асфальтобетонных смесей становится все более популярной в дорожном строительстве благодаря её экологическим преимуществам и способности улучшать технические и технологические свойства смесей. ТАС — это альтернативная технология, разработанная для повышения энергоэффективности за счет снижения температуры производства и выбросов. По данным Института асфальта США, ТАС представляет собой модифицированную смесь ГАС, которая производится, помещается и уплотняется при температуре на 10–40 °С ниже, чем температура, необходимая для обычной смеси ГАС [21, 24].

ТАС – это экологически чистая технология, в которой для нагрева агрегатов используется меньшее количество топлива, снижается уровень выбросов газов, выделяется меньше загрязняющих веществ, а также уменьшается процесс старения асфальтобетона во время строительства. Эти факторы способствуют продлению срока службы дороги и позволяют раньше открыть движение [21, 24, 25, 26].

Проанализировав характеристики технологий приготовления асфальтобетонных смесей, используемых в дорожном строительстве, и проведя обзор научных исследований в этой области, мы пришли к заключению о том, что технология ТАС является наиболее подходящей для применения в условиях САР, поскольку с её помощью может быть решено большинство проблем, с которыми сталкивается дорожная отрасль страны, и извлечены следующие выгоды:

- экологические выгоды, связанные со снижением выбросов газов на заводах по производству асфальтобетона;
- экономические выгоды, связанные со снижение энергопотребления и финансовых затрат;
- технические выгоды, связанные с повышением качества уплотнения смеси, с увеличением расстояния между асфальтобетонным заводом и строительной площадкой, и повышением эффективности применяемого автотранспорта вследствие увеличения времени нахождения смеси при требуемой для её укладки температуре;
- производственные выгоды, связанные с большей свободой выбора места расположения завода и возможностью его размещения в городских районах.
- 3. Сложность применения ТАС в Сирии. Несмотря на многочисленные преимущества, которыми обладают теплые асфальтобетонные смеси, обеспечивающие многие требуемые характеристики покрытий, соответствующие текущей ситуации в дорожной сети в Сирии, их применение в условиях Сирийской Арабской Республики сопровождается рядом трудностей, которые необходимо знать и учитывать при применении этого типа смеси, а именно: выбор подходящей технологии; учет физико-механических свойств ТАС; отсутствие технической литературы и строительной контроля.

Выбор подходящей технологии. В настоящее время существует три ведущие технологии, которые могут быть реализованы для производства ТАС: использование химических добавок, органических добавок и методов вспенивания [24, 25]. Химические добавки улучшают обрабатываемость и компактность за счет уменьшения трения между вяжущим веществом и заполнителем, тогда как органические добавки работают за счет снижения вязкости вяжущего при температуре, превышающей температуру плавления добавки, что позволяет проводить смешивание при более низких температурах. Методы вспенивания работают путем временного изменения состояния вяжущего вещества из жидкости в пену, что приводит к снижению его эффективной вязкости при перемешивании и улучшает процесс перемешивания при более низких температурах [25, 26]. Поэтому следует изучить имеющиеся варианты, чтобы выбрать подходящую технологию производства с учетом материалов, доступных и используемых при изготовлении асфальтобетонных смесей, климатических условий и условий движения в регионе, а также с учетом наименьших экономических затрат.

Физико-механические свойства ТАС. Некоторые свойства теплых асфальтобетонных смесей могут подходить для условий одного региона и не подходить для условий другого. Например, в Сирийской Арабской Республике летом высокие температуры, что снижает вязкость вяжущего. В случае использования теплых смесей, это может снизить водостойкость и увеличить вероятность износа верхних слоев покрытия. Поэтому следует изучить характеристики асфальтобетонных смесей, применяемых в соответствии с условиями Сирийской Арабской Республики, а также определить модификаторы или добавки, необходимые для улучшения характеристик ТАС в течение срока службы.

Отсутствие технической и практической экспертизы. Технология теплых асфальтобетонных смесей – это новая технология, которая еще не применялась в Сирийской Арабской Республике. Это означает, что отсутствуют экспериментальные данные, которые могли бы послужить базой для определения технических условий, методов приготовления и применения смеси. Поэтому необходимо провести серию экспериментальных исследований для определения конкретных технических условий и методов обработки, которые соответствовали бы условиям Сирийской Арабской Республики, а также подготовить квалифицированные технические кадры, необходимые для осуществления технологии ТАС на всех этапах производства, включая надзор и контроль.

Выводы. Результаты исследования показали, что технологию приготовления теплых асфальтобетонных смесей с учетом трудностей, указанных в данной статье, следует считать наиболее подходящим типом асфальтобетонных смесей для применения в условиях Сирийской Арабской Республики. Данная технология, по сравнению с горячими и холодными смесями, обеспечивает многие преимущества для дорожной сети САР: экономию энергии и топлива; относительно длительное время реализации и, следовательно, увеличение расстояния транспортировки от завода до объекта строительства; низкие температуры смешивания и уплотнения и, следовательно, продление строительного сезона, что будет способствовать выполнению больших объемов строительных работ; сокращение выбросов вредных газов и обеспечение экологически здоровой окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. DW Academy. World Bank Report: War Syrian Losses [Электронный ресурс]. URL: https://p.dw.com/p/2gIS7 (дата обращения: 23.10.2019).

- 2. Комаров Ю.Я., Алшахван А. Улучшение условий дорожного движения на перекрестке Отеля Пульмана в г. Алеппо (САР) // Молодой ученый. 2018. № 20. С. 148–152.
- 3. Комаров Ю.Я., Алшахван А. Влияние диаметра кольцевого пересечения Омар Абу Риша в г. Алеппо (САР) на параметры транспортного потока // Молодой ученый. 2018. № 14. С. 26–30.
- 4. Syrian Arab Republic Ministry of Transport Ministry of Transport. Road Performance [Электронный ресурс]. URL: http://mot.gov.sy/web/orginal/spage.php?cid=10&id=94#1 (дата обращения: 24.10.2019).
- 5. Al-Bayati H.KH., Tighe S.L., Achebe J. Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt // Resources, Conservation and Recycling. 2018. No. 130. Pp. 200–214. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.11.027.
- 6. Hamedi Gh.H., Tahami S.A. The effect of using anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2018. No. 81. Pp. 90–97. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.03.016.
- 7. Syrian Arab Republic Central Bureau of Statistics. [Электронный ресурс]. URL: http://cbssyr.sy/ (дата обращения: 25.10.2019).
- 8. Al-Mohamad R. Traffic (1). Syria: Aleppo university, 2001. 184 p.
- 9. Алшахван А. Совершенствование организации дорожного движения в г. Алеппо (САР) в районе Мухафаза. Дис....магистратура. Волгоград. 2018. 103 с.
- 10.Sputnik-Arabic. [Электронный ресурс]. URL:
- https://cdnarabic1.img.sputniknews.com/images/10 2279/49/1022794984.jpg (дата обращения: 01.05.2018).
- 11.Al-Nabaa news. [Электронный ресурс]. URL:

https://annabaa.org/aarticles/fileM/23/5bc3ec40220 10.jpg (дата обращения: 15.10.2018).

- 12.Enab Baladi news. [Электронный ресурс]. URL: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/enabbaladi/arabic/wp-content/uploads/2019/09/syria6.jpg (дата обращения: 08.09.2019).
- 13.Center Al-Furat news. [Электронный ресурс]. URL: http://fcdrs.com/storegefiles/5bc335811f65c.jpg (дата обращения: 14.10.2018).
- 14. Almeida-Costa A., Benta A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt // J. Cleaner Prod. 2016. No. 112. Pp. 2308–2317. doi: 10.1016/j.jcle-pro.2015.10.077. Гезенцвей Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон. М.: Транспорт, 1985. 350 с.

- 15.Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж: изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. 272 с.
- 16.Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. М.: Транспорт, 1973. 246 с.
- 17.Dias L. G. Creep performance evaluation of Cold Mix Asphalt patching mixes // International Journal of Pavement Research and Technology. 2016. No. 9. Pp. 149–158. doi: 10.1016/j.ijprt.2016.04.002.
- 18.Ling C., Hanz A., Bahia H. Measuring moisture susceptibility of Cold Mix Asphalt with a modified boiling test based on digital imaging // Construction and Building Materials. 2016. No. 105. Pp. 391–399. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.093.
- 19. Syrian general directorate of meteorology. [Электронный ресурс]. URL: https://www.facebook.com/Meteo.sy/ (дата обращения: 26.09.2019).
- 20. Радовский Б.С. Технология нового асфальтобетона в США [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://bitumen.globecore.ru/wp-content/uploads/sites/5/2015/08/tehnologia_tverdog o_asfaltobetona.pdf (дата обращения: 05.06.2018).

- 21.Liu Q., Yu W., Wu Sh., Schlangen E., Pan P. A comparative study of the induction healing behaviors of hot and warm mix asphalt // Construction and Building Materials. 2017. No. 144. Pp. 663–670. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.195.
- 22. Vatikus A., Čygas D., Laurinavičius A., Vorobjovas V., Perveneckas Z. Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties // Construction and Building Materials. 2016. No. 112. Pp. 800–806. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.212.
- 23. Capitão S.D., Picado-Santos L.G., Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt // Constr. Build. Mater. 2012. No. 36. Pp. 1016–1024. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038.
- 24. Jamshidi A., Hamza M. O., You Z. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art // Construction and Building Materials. 2013. No. 38. Pp. 530–553. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015.
- 25.Omari I., Aggarwal V., Hesp S. Investigation of two Warm Mix Asphalt additives // International Journal of Pavement Research and Technology. 2016. No. 9. Pp. 83–88. doi: 10.1016/j.ijprt.2016.02.001.

Информация об авторах

Алшахван Аладдин, аспирант кафедры строительства и эксплуатации автомобильных дорог. E-mail: alaaalaash@yahoo.com. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Калгин Юрий Иванович, доктор технических наук, проф кафедры строительства и эксплуатации автомобильных дорог. E-mail: kalgin36@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Поступила в ноябре 2019 г. © Алшахван А., Калгин Ю.И., 2020

*Alshahwan A., Kalgin Yu.I.

Voronezh State Technical University. *E-mail: alaaalaash@yahool.com

THE IMPORTANCE OF THE USE OF WARM MIX ASPHALT FOR CONSTRUCTION ROADS IN CONDITIONS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC

Abstract. As a result of prolonged hostilities in the Syrian Arab Republic, maintenance and repair of roads are not carried out for a long time, which led to the decline of the road network. Roads of the Syrian Arab Republic require significant rehabilitation; repairs must be carried out within a short period at the lowest cost, while achieving optimal technical characteristics. Weak economic potential of the country, low fuel reserves of various types, in addition to the huge destruction of the road network - all these difficulties facing the reconstruction process. This article is devoted to the study of the characteristics of the technologies of asphalt mixes used in road construction, and the determination of the most suitable technology for current conditions. As a result of research, it is emphasized that warm asphalt mix is the best choice compared to other types of technologies: it reduces energy consumption, reduces production costs, helps to extend the construction season, expand production capacities, save the environment, etc.

Keywords: Syrian Arab Republic, asphalt concrete, warm mix asphalt, road rehabilitation, greenhouse gas.

REFERENCES

- 1. DW Academy. World Bank Report: War Syrian Losses. URL: https://p.dw.com/p/2gIS7 (date of treatment: 23.10.2019).
- 2. Komarov Yu.Y., Alshahwan A. Improving traffic conditions at the intersection of the Pulman Hotel in Aleppo (SYR) [Uluchshenie uslovij dorozhnogo dvizheniya na perekrestke Otelya Pul'mana v g. Aleppo (SAR)]. Young scientist. 2018. No. 20. Pp. 148–152. (rus)
- 3. Komarov Yu.Y., Alshahwan A. The effect of the roundabout diameter on the traffic parameters of the flow at the intersection of the Omap Abu Risha in Aleppo (SYR) [Vliyanie diametra kol'cevogo peresecheniya Omar Abu Risha v g. Aleppo (SAR) na parametry transportnogo potoka]. Young scientist. 2018. No. 14. Pp. 26–30. (rus)
- 4. Syrian Arab Republic Ministry of Transport Ministry of Transport. Road Performance. URL: http://mot.gov.sy/web/orginal/spage.php?cid=10&id=94#1 (date of treatment: 24.10.2019).
- 5. Al-Bayati H. KH., Tighe S. L., Achebe J. Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt. Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 130. Pp. 200–214. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.11.027.
- 6. Hamedi Gh. H., Tahami S. A. The effect of using anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2018. Vol. 81. Pp. 90–97. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.03.016.
- 7. Syrian Arab Republic Central Bureau of Statistics. URL: http://cbssyr.sy/ (date of treatment: 25.10.2019).
- 8. Al-Mohamad R. Traffic (1). Syria: Aleppo university, 2001. 184 p.
- 9. Alshahwan A. Improving the organization of traffic in Aleppo (SYR) in the governorate area [Sovershenstvovanie organizacii dorozhnogo dvizheniya v g. Aleppo (SAR) v rajone Muhafaza]. Master's thesis. Volgagrad. 2018. 103 p.
- 10. Sputnik-Arabic. URL: https://cdnarabic1.img.sputniknews.com/images/102279/49/1022794984.jpg (date of treatment: 01.05.2018).
- 11. Al-Nabaa news. URL: https://annabaa.org/aarticles/fileM/23/5bc3ec4022010.jpg (date of treatment: 15.10.2018).
- 12. Enab Baladi news. URL: https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/enabbaladi/arabic/wp-content/uploads/2019/09/syria6.jpg (date of treatment: 08.09.2019).
- 13. Center Al-Furat news. URL: http://fcdrs.com/storegefiles/5bc335811f65c.jpg (date of treatment: 14.10.2018).

- 14. Almeida-Costa A., Benta A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. J. Cleaner Prod. 2016. Vol. 112. Pp. 2308–2317. (https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.077).
- 15. Gezentsvey L.B., Gorelyshev N.V., Boguslavsky A.M., Korolev I.V. Asphalt concrete [Dorozhnyj asfal'tobeton]. Moscow: Transport, 1985. 350 p. (rus)
- 16. Kalgin Yu.I. Modified Bitumen Road Bitumen-Mineral Materials [Dorozhnye bitumomineral'nye materialy na osnove modificirovannyh bitumov]. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2006. 272 p. (rus)
- 17. Kolbanovskaya A.S., Mikhailov V.V. Road bitumen [Dorozhnye bitumy]. Moscow: Transport, 1973. 246 p. (rus)
- 18. Dias L. G. Creep performance evaluation of Cold Mix Asphalt patching mixes. International Journal of Pavement Research and Technology. 2016. Vol. 9. Pp. 149–158. (https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.04.002).
- 19. Ling C., Hanz A., Bahia H. Measuring moisture susceptibility of Cold Mix Asphalt with a modified boiling test based on digital imaging. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 105. Pp. 391–399. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.093).
- 20. Syrian general directorate of meteorology. URL: https://www.facebook.com/Meteo.sy/ (date of treatment: 26.09.2019).
- 21. Radovsky B.S. New Asphalt Technology in the USA [Tekhnologiya novogo asfal'tobetona v SSHA]. AdobeAcrobatReader. URL: https://bitumen.globecore.ru/wp-content/up-loads/sites/5/2015/08/tehnologia_tver-dogo_asfaltobetona.pdf (date of treatment: 05.06.2018).
- 22. Liu Q., Yu W., Wu Sh., Schlangen E., Pan P. A comparative study of the induction healing behaviors of hot and warm mix asphalt. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 144. Pp. 663–670. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.195.
- 23. Vatikus A., Čygas D., Laurinavičius A., Vorobjovas V., Perveneckas Z. Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 112. Pp. 800–806. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.212.
- 24. Capitão S.D., Picado-Santos L.G., Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. Constr. Build. Mater. 2012. Vol. 36. Pp. 1016–1024. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038.
- 25. Jamshidi A., Hamza M. O., You Z. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit®:

State-of-the-art. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 38. Pp. 530–553. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015.

26. Omari I., Aggarwal V., Hesp S. Investigation of two Warm Mix Asphalt additives. International Journal of Pavement Research and Technology. 2016. Vol. 9. Pp. 83–88. doi: 10.1016/j.ijprt.2016.02.001

Information about the authors

Alshahwan, Aladdin. Postgraduate student. E-mail: alaaalaash@yahoo.com. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-Letiya Oktyabrya, 84.

Kalgin, Yuri I. DSc, Professor. E-mail: kalgin36@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20-Letiya Oktyabrya, 84.

Received in November 2019

Для цитирования:

Алшахван А., Калгин Ю.И., Актуальность применения теплых асфальтобетонных смесей для дорожного строительства в условиях Сирийской Арабской Республики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-26-33

For citation:

Alshahwan A., Kalgin Yu.I. The importance of the use of warm mix asphalt for construction roads in conditions of the Syrian Arab Republic. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-26-33

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43

Фролов Н.В.

Белгородский государственный технологический университет им. $B.\Gamma$. Шухова E-mail: frolov pgs(a)mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ РАЗВИТИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОНА В ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ СИЛОВЫХ И СРЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. В статье рассмотрены основные аспекты развития коррозионных повреждений бетона в железобетонных конструкциях. Отмечается, что главными количественными показателями таких повреждений выступают глубина и коэффициент повреждения. Их изменение во времени характеризует кинетику развития коррозионных повреждений бетна. Для включения в нормативные документы представляется перспективной кинетическая модель развития коррозионных повреждений В.М. Бондаренко. С целью ее дополнительного обоснования проведены специальные экспериментальные исследования нагруженных образцов железобетонных балок и ненагруженных образцов в виде бетонных кубов и призм при длительных воздействиях сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных сред. Получены новые опытные данные по особенностям накопления коррозионных повреждений бетона с учетом влияния различных эксплуатационных факторов. Установлено, что развитие повреждений имеет выраженный затухающий с течением времени характер и зависит от вида эксплуатационной среды, наличия трещин, знака и уровня действующих в бетоне напряжений. При сульфатной коррозии коэффициент повреждения наружного слоя бетона в переходной зоне не принимает значение равное нулю. Сделан вывод о том, что принятая модель достаточно достоверно описывает развитие коррозионных повреждений бетона в указанных агрессивных средах.

Ключевые слова: коррозионное повреждение бетона, изгибаемый железобетонный элемент, кинетика развития, силовое и средовое воздействие, модель.

Введение. Одной из главных причин снижения прочности нормальных сечений и повышения деформативности изгибаемых железобетонных элементов при эксплуатации являются коррозионные повреждения бетона, образующиеся из-за активного воздействия агрессивной среды. Их корректный учет необходим при оценке текущего и прогнозировании дальнейшего технического состояния и, соответственно, при обеспечении надежности и долговечности железобетонных конструкций [1–3].

При коррозии бетона выделяется два основных процесса: диффузионный перенос агрессивных вещества в структуре бетона и их взаимодействие с реакциоспособными компонентами цементного камня. Первый процесс отражает глубину коррозионных повреждений, а второй, каким образом и насколько по этой глубине произошло изменение деформативно-прочностных свойств бетона.

Коррозионные повреждения бетона в сечении элемента распределяются следующим образом: наибольшие разрушения образуются у поверхностей, контактирующих с агрессивной средой; далее по мере продвижения коррозионного фронта поврежденность бетона уменьшается и на некоторой глубине сходит на нет. Этот весьма полезный для науки подход позволил установить, что с течением времени в сечении воз-

можно формирование нескольких зон, различающихся степенью деструкции: зона полного разрушения, переходная и неповрежденная зоны, в которых силовое сопротивление бетона соответственно полностью утрачено, частично и полностью сохранено [4, 5].

В работе [6] для изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями бетона предлагаются две расчетные схемы нормального сечения. В одной из них зона полного разрушения отсутствует (рис. 1, а). Эта схема характеризует как начальные этапы развития коррозии бетона при любых агрессивных средах, так и ее поздние этапы при слабоагрессивных средах. Вторая схема на промежуточных этапах вытекает из первой и характеризует развитие коррозии бетона при сильноагрессивных средах (рис. 2, б). Она имеет все три зоны с различной степенью деструкции. При этом стоит заметить, что здесь коэффициент повреждения наружного слоя бетона K_I^* равен нулю.

Таким образом, главными количественными показателями коррозионных повреждений бетона выступают глубина повреждения, равная глубине распространения агрессивных веществ по сечению элемента, и коэффициент повреждения, определяемый для отдельных слоев бетона как отношение значений прочности на сжатие в конце и в начале наблюдений. Изменение этих

показателей во времени характеризует кинетику развития коррозионных повреждений.

На сегодняшний день для описания кинетики развития коррозионных повреждений бетона в железобетонных конструкциях разработано множество моделей [7], которые можно между собой условно разделить на две группы. В

первой из них учитывается влияние на процессы коррозии конструктивных особенностей, трещин, вида и концентрации агрессивной среды [8—15]. Во второй менее многочисленной группе моделей, помимо всего прочего, учитывается влияние на процессы коррозии знака и уровня действующих в бетоне напряжений [6, 16—20].

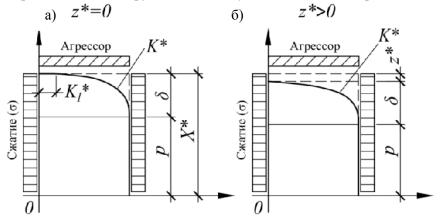


Рис. 1. Расчетные схемы нормального сечения изгибаемого железобетонного элемента с коррозионными повреждениями бетона:

а) зона полного разрушения отсутствует; б) имеются все три зоны с различной степенью деструкции

В ближайшем будущем неизбежно введение в российские нормы проектирования обязательных требований расчета железобетонных конструкций по новой (третьей) группе состояний по долговечности. Для включения в нормативные документы представляется перспективной модель развития коррозионных повреждений В.М. Бондаренко [6]. В ее методологической основе лежит закон действующих масс Гульдберга-Вааге, что выгодно ее отличает от эмпирических моделей, при этом в своих математических выражениях она значительно проще, чем модели, основанные на законах массопереноса Фика. По данной модели выполнено большое количество теоретических исследований, но объем опытных данных пока недостаточен. В связи с этим были проведены дополнительные экспериментальные исследования развития коррозионных повреждений бетона.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования предусматривали испытания образцов железобетонных балок и вспомогательных образцов в виде бетонных кубов и призм.

Железобетонные балки были изготовлены прямоугольного сечения $60 \times 100(h)$ мм с расчетным пролетом $l_0 = 1400$ мм в количестве 27 образцов. Для набора прочности бетона все образцы хранились 28 суток в одном лабораторном помещении с нормальным температурно-влажностным режимом, после чего они были разделены на одну контрольную (11 шт.) и две основные (по 8 шт.) группы балок-близнецов. Далее была проведена первая серия испытаний железобетонных

балок кратковременной нагрузкой на статический изгиб до разрушения, включавшая три образца из контрольной группы, по результатам которой определена величина разрушающей нагрузки $P_u^{\rm EK-0}$. Оставшиеся 24 образца были нагружены до уровня $0.6P_u^{\rm EK-0}$ и помещены на заданный промежуток времени в различные эксплуатационные среды. Последующие серии испытаний балок кратковременной нагрузкой до разрушения включали по два образца из каждой группы.

Для определения деформативно-прочностных характеристик бетона вместе с изготовлением каждой группы образцов железобетонных балок заливались бетонные кубы $100 \times 100 \times 100$ мм и призмы $100 \times 100 \times 400$ мм. При наборе прочности и во время длительных испытаний они находились в тех же условиях, что и балки.

При изготовлении всех образцов применялся бетон класса по прочности на сжатие B20. Состав бетонной смеси определялся согласно указаниям ГОСТ 27006-86 и включал: вяжущее на цементной основе — портландцемент марки M500 без добавок производителя EuroCement; крупный заполнитель — гранитный щебень с размером фракции 5—15 мм; мелкий заполнитель — песок средней крупности; воду. Расход указанных сырьевых материалов на приготовление 1 м³ смеси представлен в табл. 1. Помимо этого, бетонная смесь одной из основных групп образцов содержала хлорид натрия (NaCl) тонкого помола в соотношении до 5 % от массы цемента.

Таблица 1

Состав бетонной смеси при изготовлении образцов

Класс бетона	Расход мат	Отношение			
по прочности на сжатие	Цемент (Ц)	Песок (П)	Щебень (Щ)	Вода (В)	В/Ц
B20	280,2	840,6	1094,9	184,3	0,66

В данных экспериментальных исследованиях основным варьируемым параметром выступала длительность силовых и средовых воздействий на образцы, равная 180, 360, 720 и 1080 суток с начала испытаний.

Образцы контрольной группы находились в том же лабораторном помещении, что и при наборе прочности, т.е. в неагрессивной среде. Образцы первой и второй основных групп находились соответственно в сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных средах, которые были искусственно созданы в этом же помещении для накопления коррозионных повреждений бетона. Для этого был изготовлен специальный стенд

(рис. 2), основным элементом которого являлись ванны с жидким электролитом. Одна ванна, в которой находился 2 %-й водный раствор серной кислоты (H₂SO₄), была предназначена для моделирования воздействия на образцы сульфатной агрессивной среды, другая ванна, в которой находилась дистиллированная вода, была предназначена для моделирования воздействия хлоридной агрессивной среды на образцы, содержащих в бетоне добавку NaCl. Образцы каждый день на 15-20 минут опускали в ванны с электролитом для увлажнения, после чего их оттуда извлекали и оставляли высыхать в условиях, при которых хранились образцы контрольной группы.

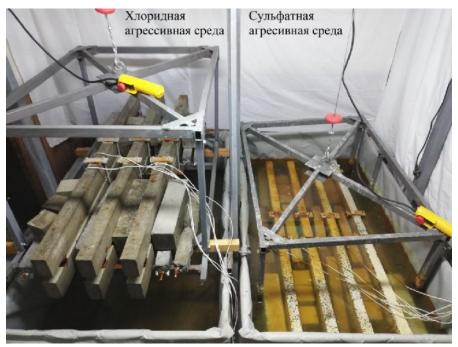


Рис. 2. Стенд для длительных испытаний образцов в агрессивных средах

В ходе длительных испытаний образцов железобетонных балок контролировалось изменение деформаций бетона по высоте сечений в зоне чистого изгиба, высоты и ширины раскрытия трещин, массы, размеров сечений; на всех гранях неразрушающими методами определялась прочность бетона.

Испытания железобетонных балок кратковременной нагрузкой на статический изгиб до разрушения проводились в соответствии с положениями ГОСТ 8829.

Бетонные кубы были использованы для испытаний на сжатие, призмы для испытаний на

сжатие и растяжение при изгибе. Данные испытания образцов бетона производились по методикам ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 24452-80 во время каждой серии испытаний балок нагрузкой до разрушения.

После доведения всех образцов до разрушения индикаторным методом с использованием 1 %-го раствора фенолфталеина устанавливались глубина коррозионных повреждений бетона.

Основная часть. Теоретические исследования. Согласно модели В.М. Бондаренко [6] развитие коррозионных повреждений бетона с течением времени при воздействии агрессивной

(2)

(3)

среды может проходить по трем кинетическим вариантам:

- Первый кольматационный [21], иначе затухающий, который характеризуется постепенной остановкой и обнулением коррозионных повреждений бетона в сечении элемента (для эксплуатируемых железобетонных конструкций является основным);
- Второй фильтрационный, при котором агрессивная среда полностью проходит толщу бетона конструкции и выносит из нее образовавшиеся продукты коррозии;
- Третий лавинный, при котором агрессивная среда выносит за пределы конструкции компоненты цементного камня и наступает полное разрушение.

Для всех вариантов кинетика неравновесных процессов коррозионных повреждений бетона описывается дифференциальным уравнением [22]:

$$\frac{d\Delta\delta(t,t_0)}{dt} = -\alpha \left[\Delta\delta(t,t_0)\right]^m,\tag{1}$$

при этом:

зионных повреждений имеет кольматационный характер, при этом:

— когда
$$m = 1$$
:

c ($-\alpha 0 - t_0$

 $\Delta \delta(t, t_0) = \frac{\delta_{\kappa p}(\mathbf{b}_0 - \delta(t t_0))}{\delta_{\kappa p}(\mathbf{b}(t))} = 1 - \frac{\delta(t, t_0)}{\delta_{\kappa p}(t_0)},$

лучаемые из экспериментальных данных.

представляется в общем виде:

где: $\Delta\delta$ — относительный дефицит текущего зна-

чения глубины коррозионных повреждений δ ;

 t_0 — время, соответствующее началу наблюдений;

t – текущее время; α , m, $\delta_{\kappa p}$ – параметры кинетики

развития коррозионных повреждений бетона, по-

кущей глубины коррозионных повреждений

 $\delta(t,t_0) = f_m(\alpha, m, t) (\cdot \delta_{\kappa n}, t_0)$

Решение уравнения (1) для нахождения те-

В случае $m \ge 0$ кинетика продвижения корро-

$$f_{m=1}(\alpha \, \mathfrak{m}, t \, \mathfrak{h}_0 1 = -\Delta \delta(t \, t_0) \cdot e^{-\alpha(0-t_0)}, \qquad (4)$$

— когда m > 1, при этом m это целые положительные числа:

$$f_{m>1}(\alpha \, m, t \,)_{0} = -\left(\left[\Delta \delta(t \, t_{0})\right]^{-m+1}(1) (n) - m + t - t_{0}\right)^{\frac{1}{-m+1}}$$
(5)

В случае $0 \le m < 1$ кинетика продвижения коррозионных повреждений имеет фильтрационный характер, при этом, когда m = 0:

$$f_{m=0}(\alpha m, t)() = \frac{\delta(t_0, t_0)}{\delta_{\kappa n}()_0} - \alpha t - t_0$$
 (6)

Когда m < 0 кинетика продвижения коррозионных повреждений имеет лавинный характер, а выражение $f_{m<0}(\alpha, m, t, t_0)$ определяется по (5), при этом m это целые отрицательные числа.

Характер изменение параметров кинетики коррозионных повреждений α , m, $\delta_{\kappa p}$ зависит от знака и уровня действующих в бетоне напряжений. При сжатии бетона до уровня напряжений, соответствующих началу структурного микротрещиноообразования, проницаемость бетона для агрессивной среды снижается до минимума. С дальнейшим ростом уровня сжимающих напряжений до предела длительной прочности на сжатие проницаемость бетона возрастает. При растяжении проницаемость бетона для агрессивной среды возрастает при любых уровнях напряжений.

Экспериментальные исследования. Коррозия бетона, связанная с моделированием воздействия хлоридов, протекала по первому виду согласно классификации В.М. Москвина, при котором на поверхности образцов появлялись высолы растворенных компонентов цементного камня (рис. 3, а). Накопление повреждений проходило

по схеме без полного разрушения бетона (см. рис. 1, а).

Под воздействием сульфатсодержащей агрессивной среды коррозия бетона проходила по третьему виду, при котором образовавшиеся продукты химических реакций оседали в структуре бетона, что со временем приводило к его полному разрушению (рис. 3, б). Накопление коррозионных повреждений соответствовало расчетной схеме, имеющей три зоны с различной степенью деструкции (см. рис. 1, б). При этом в ходе экспериментальных исследований установлено, что для этой схемы коэффициент повреждения поверхностного слоя бетона K_I^* в переходной зоне не принимает значение равное нулю.

Выявленное может быть объяснено механизмом разрушения бетона при сульфатной коррозии. Сначала образуемые продукты реакций между сульфат-ионами и компонентами цементного камня заполоняют структурные пустоты и уплотняют бетон, в связи с этим его прочность несколько растет (до 5-10%); затем с увеличением объема продуктов коррозии создается критическое давление на стенки пор, при котором в бетоне появляются микротрещины, способствующие более свободному проникновению агрессивных веществ; дальнейшее накопление коррозионных продуктов в микротрещинах приводит к разуплотнению бетона и снижению его прочно-

сти. По проведенным оценкам полная утрата бетоном силового сопротивления (самопроизвольное разрушение) происходит при достижении прочности на сжатие величины $(0,15..0,2)R_b$. Та-

ким образом, коэффициент повреждения поверхностного слоя бетона в переходной зоне не может принимать значение равное нулю, как это ошибочно показано на рис. 1, а. Хотя это идет в запас прочности и упрощает схему.



гис. 5. Коррозионные повреждения остона.а) при воздействии хлоридсодержащей среды; б) при воздействии сульфатсодержащей среды

Результаты экспериментальных исследований состояния бетона в железобетонных балках и

ненагруженных вспомогательных образцах в различных эксплуатационных средах представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 Прочностные и деформативные характеристики бетона в различных экплуатационных средах

Vanauranyaryyyy 5a		Длительность силовых и средовых воздействий t ,					
Характеристики бе-	Эксплуатационная среда	сут.					
тона		0	180	360	720	1080	
V	Неагрессивная		39.2	39.6	39.9	40.1	
Кубиковая прочность на сжатие <i>R</i> , МПа	Сульфатная	31.0	29.6	28.4	26.9	25.8	
на сжатие к, мпта	Хлоридная		38.4	38.9	39.1	38.9	
Призменная проч-	Неагрессивная		30.4	30.7	30.9	31.0	
ность на сжатие R_b ,	Сульфатная	23.8	23.7	22.7	21.5	20.6	
МПа	Хлоридная		29.6	29.9	30.0	29.7	
Пиония от на поста	Неагрессивная		2.9	2.9	3.0	3.0	
Прочность на растя-	Сульфатная	2.3	2.4	2.3	2.2	2.2	
жение R_{bt} , МПа	Хлоридная		2.9	2.9	3.0	2.9	
II	Неагрессивная		35500	35500	36000	36000	
Начальный модуль	Сульфатная	30000	30500	30000	29500	29000	
упругости E_b , МПа	Хлоридная		34000	34000	34500	34100	
	Неагрессивная		0.00190	0.00193	0.00195	0.00195	
Деформации ε_{bR}	Сульфатная	0.00180	0.00190	0.00195	0.00200	0.00205	
	Хлоридная		0.00195	0.00200	0.00205	0.00210	
Моро по полически	Неагрессивная		77	90	94	94	
Мера ползучести $C^*(t, 28) \cdot 10^6$, МПа ⁻¹	Сульфатная	-	91	106	110	112	
(i, 20) 10°, MIIa	Хлоридная		79	92	96	96	
Поформации изо	Неагрессивная		0.00018	0.00019	0.00019	0.00019	
Деформации усадки	Сульфатная	-	0.00017	0.00018	0.00018	0.00018	
$\varepsilon_{ch}(t,28)$	Хлоридная		0.00017	0.00018	0.00018	0.00018	

Таблица 3 Характеристики кинетики развития коррозионных повреждений бетона в различных эксплуатационных средах

Характеристики	Агрессивная	Напряже- ния	-					
повреждений бетона	среда	в бетоне	0	180	360	720	1080	
F		$\sigma_{bt} \approx R_{bt}$		6.5 (1.8)	10.5 (2.4)	12.5 (2.8)	13 (3.1)	
Глубина коррозион-	Сульфатная	$\sigma_b = 0$	0	5 (1.6)	7.5 (2.1)	9 (2.4)	9.5 (2.6)	
ных повреждений δ , мм (полностью разрушенный бетон)		$\sigma_b = 0.55R_b$		3.5 (1.4)	5 (1.9)	5.5 (2.2)	5.5 (2.4)	
	Хлоридная	$\sigma_{bt} \approx R_{bt}$	0	17	21	22	22.5	
		$\sigma_b = 0$		14	17.5	19	19	
разрушенный остон)		$\sigma_b = 0.55R_b$		10	13	14	14	
Коэффициент по-	Сульфатная	-	1	0.78	0.74	0.70	0.67	
вреждения K^*_{l}	Хлоридная	-	1	0.97	0.97	0.97	0.96	

Согласно полученным данным изменение прочностных и деформативных характеристик бетона и развитие в нем коррозионных повреждений с течением времени зависит от вида эксплуатационной среды, наличия трещин, знака и уровня действующих напряжений. Наибольшая деградация свойств бетона наблюдается под воздействием сульфатной агрессивной среды. Максимальная и минимальная глубина коррозион-

ных повреждений бетона установлена соотвественно в растянутой и сжатой зонах сечения железобетонных балок. Повреждения бетона в ненагруженных вспомогательных образцах и в балках на уровне положения нейтральной оси оказались приблизительно равными (рис. 4, а, б). Продвижение коррозионного фронта вглубь бетона было равномерным у всех граней, за исключением боковых граней сечений изгибаемых элементов, где по высоте меняется знак и уровень напряжений.

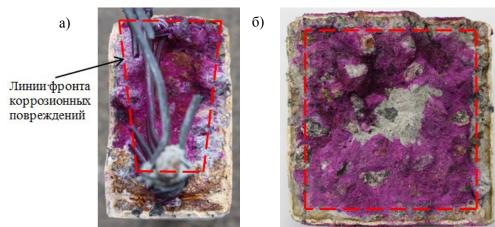


Рис. 4. Характер развития коррозионных повреждений бетона: а) в сечении железобетонной балки; б) в сечении ненагруженного вспомогательного образца

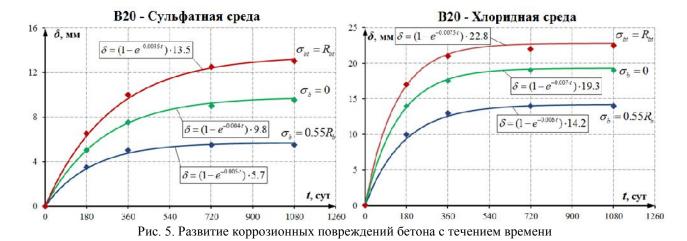
Наличие в растянутой зоне железобетонных балок эксплуатационных нормальных трещин шириной раскрытия до 0,2 мм способствовало проникновению хлоридной агрессии. На проникновение сульфатной агрессии это влияние установлено незначительным ввиду того, что произошло быстрое закупоривание трещин образовавшимися продуктами коррозии бетона.

<u>Численные</u> исследования. Графическое отображение скорости развития коррозионных повреждений бетона с течением времени при различных эксплуатационных средах показано на рис. 5. При этом маркерами обозначены точки, полученные в ходе экспериментальных исследований, а сплошными линиями расчетные кривые,

полученные с использованием формулы (3) при значении параметра кинетики m=1.

Как видно из рисунка полученные опытные данные достаточно хорошо поддаются аппроксимации с помощью принятой расчетной модели.

Следует отметить, что повреждения бетона, накопленные под воздействием сульфатсодержащей среды, при меньшей глубине развития обладают более высокой степенью разрушения, нежели чем повреждения, полученные в хлоридсодержащей среде. При этом оба вида повреждений бетона имеют выраженный затухающий во времени характер.



С учетом принятого режима увлажнение-высушивание образцов, класса бетона, концентрации агрессивных веществ и выявленных последствий деградации, эксплуатационные среды при длительных испытаниях по степени агрессивного воздействия на бетон можно классифицировать следующим образом: сульфатная — сильноагрессивная; хлоридная — слабоагрессивная.

Выводы:

- 1. Среди множества моделей, позволяющих описывать развитие коррозионных повреждений бетона с учетом эксплуатационных факторов, для включения в нормативные документы по расчету показателей долговечности железобетонных конструкций рекомендуется кинетическая модель В.М. Бондаренко.
- 2. На основе экспериментальных исследований получены новые опытные данные по кинетике развития коррозионных повреждений бетона в нагруженных образцах железобетонных балок и ненагруженных образцах бетонных кубов и призм. Развитие повреждений имеет выраженный затухающий с течением времени характер и зависит от вида эксплуатационной среды, наличия трещин, знака и уровня действующих в бетоне напряжений. Установлено, что при сульфатной коррозии коэффициент повреждения наружного слоя бетона в переходной зоне не принимает значение равное нулю - смена переходной зоны на зону с полным разрушением бетона происходит при снижении его прочности до $(0,15..0,2)R_b$.
- 3. Развитие коррозионных повреждений, имеющих затухающий с течением времени характер, достаточно достоверно поддается описанию с помощью принятой расчетной модели при значении параметра кинетики m=1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
- 2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28–31.
- 3. Peng L., Stewart M. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage to RC structures with climate change // Magazine of Concrete Research. 2014. Vol. 66. No. 22. Pp. 1–16.
- 4. Zhdanova T., Larionov E. Evaluation of Corrosion Damage of Concrete // IOP Conference Series Materials: Science and Engineering. 2019. Vol. 661. P. 012061.
- 5. Popov V., Plyusnin M., Morozov V., Pukharenko Y. Consideration of variability of concrete characteristics in calculation of reinforced concrete structures // Materials Science Forum. 2016. Vol. 871. Pp. 166–172.
- 6. Бондаренко В.М. Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5 (226). С. 13-17.
- 7. Otieno M., Beushausen H., Alexander M. Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures A critical review // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. No. 2. Pp. 240–245.
- 8. Belda A., Weerdt K., Karla H., Geiker M. Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset // Construction and Building Materials. 2018. No. 162. Pp. 847–856.
- 9. Zhou Y., Tian H., Sui L., Xing F. Strength deterioration of concrete in sulfate environment: An

experimental study and theoretical modeling // Advances in Materials Science and Engineering. 2015. No. 4. Pp.1–13.

- 10. Stawiski B., Kania T. Examining the distribution of strength across the thickness of reinforced concrete elements subject to sulphate corrosion using the ultrasonic method // Materials. 2019. Vol. 12. No. 16. P. 2519.
- 11. Silva A., Neves R., Brito J. Statistical modelling of the influential factors on chloride penetration in concrete // Magazine of Concrete Research. 2017. Vol. 69. No. 5. Pp. 1–16.
- 12. Melchers R., Li C., Lawanwisut W. Modelling deterioration of structural behaviour of reinforced concrete beams under saline environment corrosion // Magazine of Concrete Research. 2006. Vol. 58. No. 9. Pp. 575–587.
- 13. Zhao Y., Karimi A., Wong H., Hu B. Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer // Corrosion Science. 2011. Vol. 53. No. 9. Pp. 2803–2814.
- 14. Seetharam S., Laloy E., Jivkov A., Yu L. A mesoscale framework for analysis of corrosion induced damage of concrete // Construction and Building Materials. 2019. No. 216. Pp. 347–361.
- 15. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Influence of reactive fillers on concrete corrosion resistance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 372. P. 032046.
- 16. Wang H., Lu C., Jin W., Bai Y. Effect of external loads on chloride transport in concrete //

- Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. Vol. 23. No. 7. Pp. 1043–1049.
- 17. Fu C., Jin X., Ye H., Jin N. Theoretical and experimental investigation of loading effects on chloride diffusion in saturated concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2015. Vol. 13. No. 1. Pp. 30–43.
- 18. Jafarzadeh S., Chen Z., Li S., Bobaru F. A peridynamic mechano-chemical damage model for stress-assisted corrosion // Electrochimica Acta. 2019. No 323. P. 134795.
- 19. Vorechovska D., Somodikova M., Podrouzek J., Lehky D. Concrete structures under combined mechanical and environmental actions: Modelling of durability and reliability // Computers and Concrete. 2017. Vol. 20. No. 1. Pp. 99–110.
- 20. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L. Modeling of the reinforced concrete structure performance at joint influence of mechanical and chemical loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012060.
- 21.Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 83. No. 7. Pp. 198–207.
- 22. Колчунов В.И., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 54–60.

Информация об авторах

Фролов Николай Викторович, аспирант, старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: frolov_pgs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в феврале 2020 г. © Фролов Н.В., 2020

Frolov N.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov E-mail: frolov_pgs@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE KINETICS OF THE DEVELOPMENTAL CORROSIVE DAMAGES OF CONCRETE IN BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER FORCE AND ENVIRONMENTAL EFFECTS

Abstract. The article deals with the main aspects of the development of concrete corrosion damage in reinforced concrete structures. It is noted that the main quantitative indicators of such damages are the depth and the damage factor. Their change in time characterizes the kinetics of the development of concrete corrosion damage. The kinetic model of corrosion damage development by V.M. Bondarenko is presented as perspective for inclusion into normative documents. For the purpose of its additional substantiation special experimental studies of loaded samples of reinforced concrete beams and non-loaded samples in the form of concrete cubes and prisms under prolonged exposure to sulfate- and chloride-containing aggressive media

have been conducted. New experimental data on peculiarities of accumulation of corrosive damages of concrete taking into account the influence of different operational factors have been obtained. It is established that damage development has a pronounced fading character over time and depends on the type of operating medium, the presence of cracks, the sign and level of stresses acting in the concrete. In case of sulfate corrosion, the damage coefficient of the outer layer of concrete in the transition zone does not take into account the value equal to zero. It is concluded that the adopted model quite reliably describes the development of corrosive damages of concrete in these corrosive environment.

Keywords: concrete corrosion damage, bending reinforced concrete element, development kinetics, force and environmental effects, model.

REFERENCES

- 1. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Yerofeyev V.T. The modern methods for ensuring of the reinforced concrete structures durability [O sovremennyh metodah obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij]. Academia. Architecture and Construction. 2015. No. 1. Pp. 93–102. (rus)
- 2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under the influence of force and environmental factors [Koncepciya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdanij i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdejstviyah]. Industrial and Civil Engineering. 2013. No. 2. Pp. 28–31. (rus)
- 3. Peng L., Stewart M. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage to RC structures with climate change. Magazine of Concrete Research. 2014. Vol. 66. No. 22. Pp. 1–16.
- 4. Zhdanova T., Larionov E. Evaluation of Corrosion Damage of Concrete. IOP Conference Series Materials: Science and Engineering. 2019. Vol. 661. P. 012061.
- 5. Popov V., Plyusnin M., Morozov V., Pukharenko Y. Consideration of variability of concrete characteristics in calculation of reinforced concrete structures. Materials Science Forum. 2016. Vol. 871. Pp. 166–172
- 6. Bondarenko V.M. Corrosive damages as the reason for the avalanche destruction of reinforced concrete structures [Korrozionnye povrezhdeniya kak prichina lavinnogo razrusheniya zhelezobetonnyh konstrukcij]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2009. No. 5 (226). Pp. 13–17. (rus)
- 7. Otieno M., Beushausen H., Alexander M. Modelling corrosion propagation in reinforced concrete structures A critical review. Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. No. 2. Pp. 240–245.
- 8. Belda A., Weerdt K., Karla H., Geiker M. Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset. Construction and Building Materials. 2018. No. 162. Pp. 847–856.
- 9. Zhou Y., Tian H., Sui L., Xing F. Strength deterioration of concrete in sulfate environment: An

- experimental study and theoretical modeling. Advances in Materials Science and Engineering. 2015. No. 4. Pp.1–13.
- 10. Stawiski B., Kania T. Examining the distribution of strength across the thickness of reinforced concrete elements subject to sulphate corrosion using the ultrasonic method. Materials. 2019. Vol. 12. No. 16. P. 2519.
- 11. Silva A., Neves R., Brito J. Statistical modelling of the influential factors on chloride penetration in concrete. Magazine of Concrete Research. 2017. Vol. 69. No. 5. Pp. 1–16.
- 12. Melchers R., Li C., Lawanwisut W. Modelling deterioration of structural behaviour of reinforced concrete beams under saline environment corrosion. Magazine of Concrete Research. 2006. Vol. 58. No. 9. Pp. 575–587.
- 13. Zhao Y., Karimi A., Wong H., Hu B. Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer. Corrosion Science. 2011. Vol. 53. No. 9. Pp. 2803–2814
- 14. Seetharam S., Laloy E., Jivkov A., Yu L. A mesoscale framework for analysis of corrosion induced damage of concrete. Construction and Building Materials. 2019. No. 216. Pp. 347–361.
- 15. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Influence of reactive fillers on concrete corrosion resistance. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 372. P. 032046.
- 16. Wang H., Lu C., Jin W., Bai Y. Effect of external loads on chloride transport in concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2011. Vol. 23. No. 7. Pp. 1043–1049.
- 17. Fu C., Jin X., Ye H., Jin N. Theoretical and experimental investigation of loading effects on chloride diffusion in saturated concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2015. Vol. 13. No. 1. Pp. 30–43.
- 18. Jafarzadeh S., Chen Z., Li S., Bobaru F. A peridynamic mechano-chemical damage model for stress-assisted corrosion. Electrochimica Acta. 2019. No 323. P. 134795
- 19. Vorechovska D., Somodikova M., Podrouzek J., Lehky D. Concrete structures under com-

bined mechanical and environmental actions: Modelling of durability and reliability. Computers and Concrete. 2017. Vol. 20. No. 1. Pp. 99–110.

20. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L. Modeling of the reinforced concrete structure performance at joint influence of mechanical and chemical loads. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012060.

21.Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion. Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 83. No. 7. Pp. 198–207.

22. Kolchunov V.I., Kolchunov VI.I., Fedorova N.V. Deformation models of reinforced concrete under special impacts [Deformacionnye modeli zhelezobetona pri osobyh vozdejstviyah]. Industrial and Civil Engineering. 2018. No. 8. Pp. 54–60. (rus)

Information about the authors

Frolov, Nikolai V. Postgraduate student. E-mail: frolov_pgs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in February 2020

Для цитирования:

Фролов Н.В. Экспериментальные исследования кинетики развития коррозионных повреждений бетона в изгибаемых железобетонных элементах при силовых и средовых воздействиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 34–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43

For citation:

Frolov N.V. Experimental studies of the kinetics of the developmental corrosive damages of concrete in bent reinforced concrete elements under force and environmental effects. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No.2. Pp. 34–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-44-55 ¹Рыбникова И.А., ²,*Рыбников А.М.

¹Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова
²Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова
*E-mail: a.ribnikov@novoroskhp.ru

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ НАТУРНЫХ БУРОНАБИВНЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ

Аннотация. Исследовались четыре буронабивные сваи двух типоразмеров длиной 4,5 м, диаметрами голов 0,4 и 0,6 м, диаметрами нижнего торца 0,2 м с углом конусности 1о20' и 2о40' соответственно. Две сваи были оснащены по высоте четырьмя тензодинамометрами, и две — десятью мессдозами по пять с каждой из диагональных противоположных сторон. Грунты на экспериментальном полигоне сложены твёрдой супесью. По данным измерений тензодинамометров и мессдоз строились эпюры распределения усилий и напряжений в сечениях по стволу свай, а также эпюры контактных напряжений по их боковой поверхности. Результаты исследований позволили выявить, что в несущей способности буронабивных конических свай в значительной мере участвуют дополнительные силы отпора грунта по наклонной боковой поверхности при её осадке под нагрузкой. Доля отпора грунта, в зависимости от угла конусности, составляет 34—50 % от общей несущей способности, сопротивление нижнего торца — 17—23 %, трение по боковой поверхности ствола — 34—43 %. Эти данные указывают на эффективность придания стволам буронабивных свай длиной до 5 м даже незначительной конусности в пределах 1,5°—3,0°.

Ключевые слова: буронабивная свая, конусность сваи, несущая способность, мессдоза, тензодинамометр, отпор грунта, эпюра усилий, эпюра напряжений.

Введение. По сравнению с забивными сваями у цилиндрических буронабивных свай аналогичных размеров несущая способность обычно меньше из-за отсутствия уплотнённого слоя грунта вдоль боковой поверхности и под остриём (нижним торцом). Поэтому практически все усовершенствования конструкций буронабивных свай касаются устранения этого недостатка за счёт придания боковой поверхности шероховатости, волнистости, утолщений и/или устройства под нижним торцом уширений или уплотнений. Так ещё в 1927 году проф. Дмоховский В.К. [1] отмечал принцип устройства усовершенствованных свай Компрессоля (1900 г.) и Франкиньоля (1909 г.) путём тампонирования бетона в скважине, что позволяло вдавливать бетонную смесь в основание, а также стенки скважин и тем самым получать по высоте переменный диаметр конструкции. К этому же типу по технологии устройства относятся частотрамбованные сваи [2]. Известны буронабивные сваи Франки с гофрированной поверхностью ствола [3, 4].

Инженеры А.Э. Страус и Е.П. Хлебников разработали конструкции свай с неровностями по стволу и уширенной пятой [5]. Уширения стволу сваи в нижнем торце придаются камуфлетным взрывом [6], статическим вдавливанием лучевидного уширителя [7], раскатыванием роликами [8] или резанием грунта [9]. К современным разработкам повышения несущей способности буронабивных свай можно отнести буроинъ-

екционные (корневидные сваи) [10, 11], с вибровтрамбовыванием в основании сваи щебня [12], а также сваи с термохимическим уширением в основании [13], сваи РИТ с применением разрядно-импульсной [14] и электроразрядной технологий [15] для получения многоместных уширений по стволу.

К сваям повышенной несущей способности относятся набивные конической формы, изготавливаемые в пробитых лидером скважинах [16, 17]. Логично было изменить цилиндрическую форму на коническую и для буронабивных свай. В этом случае по наклонной боковой поверхности кроме сил трения появляется дополнительный нормальный отпор грунта при вертикальной нагрузке. С целью проверки наличия такого эффекта у буронабивных конических свай при их нагружении разработаны три типоразмера таких свай [18]. Диаметры голов свай были приняты $d_{\Gamma} = 0.4$; 0.5; 0.6 м. Минимальный диаметр у острия для всех свай был принят d_o= 0,2 м. При длине свай 4,5 м и принятых параметрах сечений конусность свай составила соответственно а = 1°... 2,5°. Буквенные обозначения свай были приняты по их наименованию – БКС (буронабивные конические сваи). Цифровые обозначения свай приняты по их длине в м, диаметру головы и нижнего торца у острия в сантиметрах, например, - БКС- 4,5-40/20 (длина сваи 4,5 м, голова 40 см, нижний торец у острия 20 см).

Методы и конструкции. С целью изучения взаимодействия буронабивных конических свай

заданных параметров с грунтом основания были проведены модельные [18] и натурные [19]. испытания на действие различных видов нагрузок, которые показали их эффективность. Дополнительно на экспериментальном полигоне [19] проведены исследования по распределению усилий по длине ствола и по боковой поверхности свай при статических вдавливающих нагрузках.

Известен ряд конструкций применяемых приборов и оборудования для измерений и деформаций конструкций в грунтах [20], но оптимальными для исследований конкретно буронабивных конических свай являются тензодинамометры, устройство которых приведено в работе [21] и мессдозы конструкции ЦНИИСК [22]. Поэтому предпочтение было отдано тензометрическому методу исследований, как одному из наиболее точных и надёжных [23].

Исследования проводились на четырёх буронабивных конических сваях, оснащённых тензометрическим оборудованием. В сваях БКС-4,5-40/20 с углом конусности $\alpha = 1^{\circ}20'$ и БКС-4,5-60/20 с углом конусности $\alpha = 2^{\circ}40'$ были установлены по четыре тензодинамометра. В таких же сваях БКС-4,5-40/20 и БКС-4,5-60/20 — по десять мессдоз (по пять с каждой из диагонально противоположных сторон по высоте). Грунт основания исследуемых свай на экспериментальном полигоне однородный — твёрдая супесь с объёмной массой $\rho = 1,82$ т/м³, углом внутреннего трения $\phi = 22^{\circ}$ и модулем деформации E = 18 МПа.

В статье приводятся результаты полевых испытаний натурных буронабивных конических свай БКС-4,5-40/20 и БКС-4,5-60/20, оснащённых тензометрическим оборудованием, на действие вертикальной вдавливающей нагрузки по ГОСТ 5686-2012. Несущая способность свай определялась по графикам зависимости «нагрузка-осадка» согласно СП 24.13330.2011 и СП 22.13330.2011. После каждой ступени нагружения свай снимались показания мессдоз, а также тензодинамометров, и по ним строились эпюры распределения усилий в сечениях по стволу и контактных напряжений по боковой поверхности свай.

Основная часть. Эпюры распределения усилий F_i в сечениях буронабивных конических свай, полученные по показаниям тензодинамометров, приведены на рис. 1, рис. 2. Очертание эпюр распределения усилий — криволинейное. Как видно из рисунков, основная нагрузка воспринималась верхними расширенными частями свай и уменьшалась по стволу сверху вниз. Торец у острия сваи БКС-4,5-40/20 вступал в работу сразу же при первой ступени нагрузки 12,5 кH, его сопротивление составляло 29 % от нагрузки.

При дальнейшем нагружении сваи доля сопротивления торца у острия уменьшалась до 22 % при нагрузке 125 кH, и затем вновь возрастала до 24,5 % при нагрузке 200 кH.

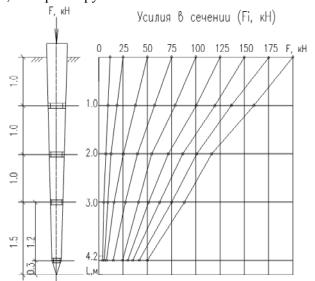


Рис. 1. Эпюры распределения усилий F_i в сечениях по стволу сваи БКС-4,5-40/20, оснащённой тензодинамометрами, при различных ступенях нагружения

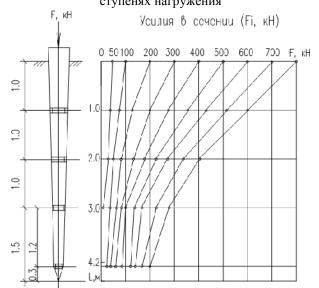


Рис. 2. Эпюры распределения усилия F_i в сечениях по стволу сваи БКС-4,5-60/20, оснащённой тензодинамометрами, при различных ступенях нагружения

У сваи БКС-4,5-60/20 нижний торец у острия вступал в работу лишь после приложения второй ступени нагружения в 100 кН, достигая сопротивления при этом 12% от величины ступени. Затем сопротивление постепенно нарастало до 19% при ступенях нагружения до 500 кН и оставалось практически неизменным в пределах 18... 19% при нагрузках 600...800 кН.

Эпюры распределения нормальных напряжений σ_i в сечениях сваи БКС-4,5-40/20 приве-

дены на рис. 3, а сваи C-4,5-60/20 — на рис 4. Значения для построения эпюр распределения напряжения в сечениях сваи G_i вычислялись по формуле

где F_i – нагрузка в i-ом сечении сваи с тензодинамометром при определённой ступени нагружения, кH; r_i – радиус рассматриваемого сечения сваи, м.

$$6_i = F_i / \pi r_i^2,$$
 (1)



Рис. 3. Эпюры распределения нормального напряжения G_i в сечениях по стволу сваи БКС-4,5-40/20, оснащённой тензодинамометрами, при различных ступенях нагружения

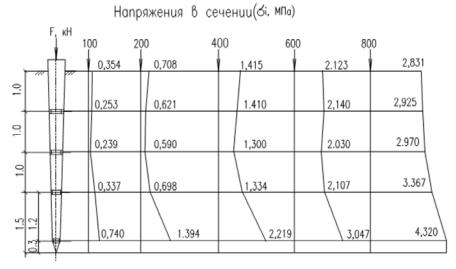


Рис. 4. Эпюры распределения нормального напряжения б_і в сечениях по стволу сваи БКС-4,5-60/20, оснащённой тензодинамометрами, при различных ступенях нагружения

У сваи БКС-4,5-40/20 нормальное напряжение по длине стола в целом распределялось равномерно, несколько уменьшаясь к острию (рис. 3). Максимальное значение $G_i = 1,622$ МПа достигалось на глубине 1 м и 3 м на последней приложенной ступени нагрузки в 200 кН. У сваи БКС-4,5-60/20 наоборот, напряжение у острия постоянно увеличивалось (рис. 4), достигая наибольшей величины $G_i = 4,320$ МПа при ступени нагрузки в 800 кН.

Эпюры нормального отпора грунта $f_i^{\text{отп}}$ по наклонной боковой поверхности свай, построенные по данным измерений напряжений мессдозами, приведены на рис. 5 б, 6 б. Удельные силы трения f_i по стволу сваи (рис. 5 в, 6 в) вычислялись по формуле

$$f_{i} = \frac{F_{i} - F_{i+1}}{\frac{\pi}{2} (d_{i} + d_{i+1}) l_{i}} - f_{i}^{omn},$$
 (2)

где F_i , F_{i+1} – показания тензодинамометра (продольные силы) в участках торцов ствола сваи,

кН; d_i , d_{i+1} — диметры торцов участков ствола сваи, м; l_i — длина образующей конусного участка ствола сваи между сечениями с тензодинамометрами, м; $f_i^{\text{отп}}$ — показания мессдоз на соответствующей глубине (в середине каждого рассматриваемого участка), МПа.

Суммарное напряжение на боковой поверхности конической сваи ($f_i + f_i^{\text{отп}}$) равнялось сумме эпюр нормальных и касательных составляющих сил сопротивления (рис. 5 a, рис. 6 a).

Анализируя результаты полученных измерений, можно отметить, что в верхней части сваи силы отпора $f^{\text{ отп}}$ проявились сразу же на первых ступенях нагружения. По мере увеличения нагрузки максимальные значения сил отпора снижались. В нижней части сваи силы отпора, имея малую величину на начальной стадии нагружения, с ростом нагрузки и при осадке сваи на 20-25 мм увеличивались, достигая своего максимума на последней ступени нагружения. Для сваи БКС-4,5-40/20 максимальное значение $f^{\text{ отп}}$ = 0,025 МПа, а для сваи БКС-4,5-60/20 оно равно $f^{\text{ отп}}$ = 0,109 МПа (рис. 5 б, рис. 6 б). Резкое увеличение сил отпора в нижней части сваи можно объяснить выпором грунта из-под её острия.

Характер эпюр касательных напряжений несколько отличается от характера эпюр нормальных напряжений. На первых ступенях касательные напряжения f_i также проявлялись в основном в верхней части свай. Затем трансформировались и становились практическими постоянными по всей длине ствола, немного увеличиваясь у острия. У сваи БКС-4,5-40/20 удельные силы трения при осадке сваи на 24 мм составили 0,028 МПа, у сваи БКС-4,5-60/20 соответственно 0,045 МПа (рис. 5 в, рис. 6 в) Отсюда можно сделать вывод, что у конических буронабивных свай силы трения по боковой поверхности зависят от величины обжатия грунта (уплотнения), окружающего сваю, при осадке сваи. Чем больше угол конусности у сваи, тем значительнее проявляются силы трения по боковой поверхности.

Суммарные эпюры напряжений на контакте «свая-грунт» близки по виду к эпюрам нормальных напряжений, то есть в формировании сопротивления свай по боковой поверхности превалирующая роль отводится нормальным силам отпора грунта. Естественно, что числовые значения распределения усилий в сечении сваи, отпора и сил трения по боковой поверхности сваи БКС-4,5-50/20 займут место в интервале между выявленными значениями этих величин для свай БКС-4,5-40/20 и БКС-4,5-60/20.

Результаты исследований показали, что несущая способность свай $F_{\text{общ}}$ на последних ступенях нагружения в основном определяется отпором грунта по наклонной боковой поверхности $F_{\text{отп}}$ (табл. 1). Соотношение между сопротивлением грунта по боковой поверхности и у острия конической сваи при различных ступенях нагружения можно проследить на совмещённых графиках. В начальной стадии нагружения сваи БКС-4,5-40/20 до нагрузки в 100 кН отмечалось интенсивное увеличение сил трения по боковой поверхности (рис. 7, кривые 5, 7). С увеличением нагрузки несущая способность за счёт сил трения и сцепления исчерпывалась при осадке сваи на 15–20 мм.

В то же время возрастал отпор грунта, на который при нагрузке в 100 кН приходилось 24 %, и в 150 кН – 30 % от общей нагрузки (рис. 7 кривые 4, 8). Сопротивление у острия на всех этапах нагружения можно принять возрастающим прямо пропорционально нагрузке, оно не превышает 30 % (рис. 7 кривые 3, 6). Характерно, что силы трения по боковой поверхности (рис. 7 кривая 5) резко отличаются от сопротивления выдёргивающей нагрузке (рис. 7 кривая 2), то есть кривая 2 характеризует не силу трения при выдёргивании, а усилия отрыва сваи от грунта.

У сваи БКС-4,5-60/20 на первых ступенях нагрузки (100-200 кН) превалирующее значение имели также силы трения по боковой поверхности (рис. 8, кривые 5, 7). При ступени в 50 кН вся нагрузка воспринималась только боковой поверхностью, так как осадка составляла лишь 0,2 мм при которой нижний конец у острия в работу ещё не включился. При нагрузке в 200 кН основная роль уже отводилась силам отпора. Так при нагрузках в 400, 600, 800 кН на силы отпора приходилось 37, 51, 57 % от них соответственно. Нижний конец сваи у острия при различных ступенях нагружения воспринимал 17–25 % от нагрузки, то есть несколько меньше, чем у сваи БКС-4,5-40/20.

Сопротивление трению резко уменьшалось при осадке сваи БКС-4,5-60/20 на 10–15 мм, однако оно полностью не мобилизовывалось и продолжало незначительно увеличиваться и при осадках на 20...24 мм. Это явление вполне закономерно и его можно объяснить тем, что мобилизация сил трения у конических свай происходит в условиях постоянно увеличивающегося нормального напряжения. Поэтому силы трения растут даже при проскальзывании сваи относительно грунта основания. У сваи БКС-4,5-40/20 это явление менее заметно, так как она имеет небольшой угол конусности.

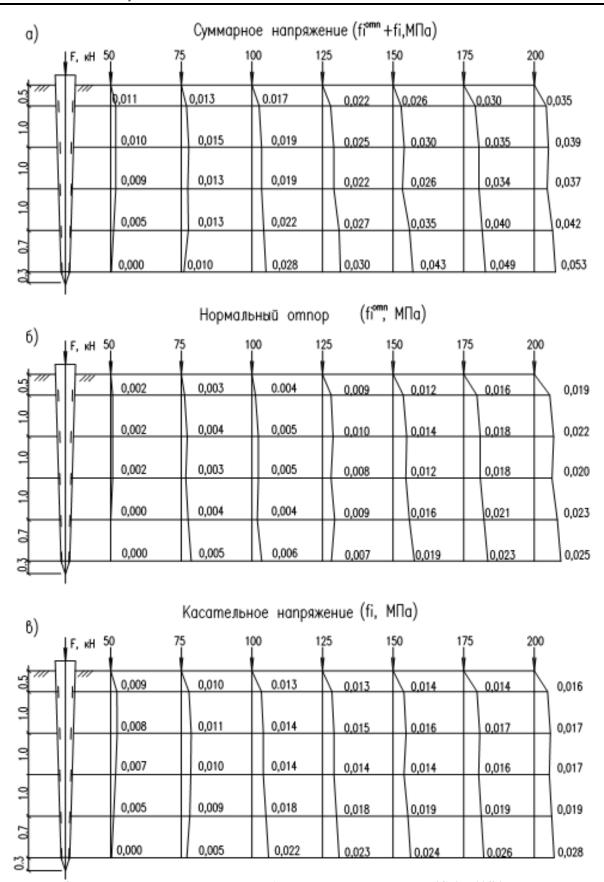


Рис. 5. Эпюры контактных напряжений на боковой поверхности сваи БКС-4,5-40/20, оснащённой мессдозами, при различных ступенях нагружения: a – суммарное напряжение; δ – нормальный отпор грунта f_i^{omn} ; ϵ – касательное напряжение f_i от сил трения

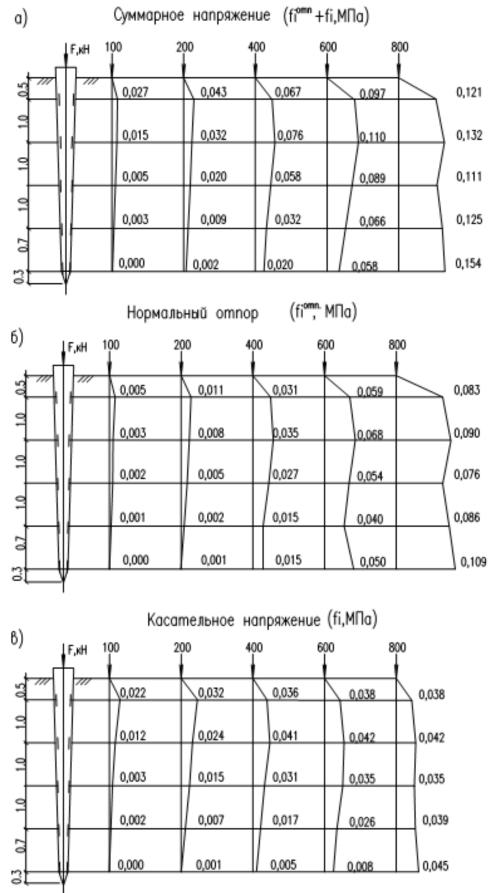


Рис. 6. Эпюры контактных напряжений на боковой поверхности сваи БКС-4,5-60/20, оснащённой мессдозами, при различных ступенях нагружения: a – суммарное напряжение; δ – нормальный отпор грунта f_i^{omn} ; ϵ – касательное напряжение f_i от сил трения

Таблица I Сопротивление буронабивных конических свай в зависимости от их осадки

Нагрузка на сваю	Осадка сваи	(Н	Fomn/Foou	
$oldsymbol{F}$ общ $,$ К H	S , мм	Focmp	F_{mpen}	Fomn	
	1	Свая БКС-4	1,5-50/20		1
12,5	0,96	5	7	0,5	0,05
25	1,94	7	16	2	0,08
50	3,13	14	29	7	0,14
75	6,50	19	41	15	0,20
100	7,48	24	52	24	0,24
125	10,11	28	60	37	0,30
150	19,72	34	63	53	0,35
175	26,47	40	65	70	0,4
200	39,05	49	68	83	0,42
225	51,33	57	70	98	0,44
250	75,88	67	71	112	0,45
		Свая БКС-4	4,5-60/20		
50	0,41	-	40	5	0,1
100	0,95	25	62	13	0,13
200	3,08	47	112	41	0,21
300	6,20	62	156	82	0,27
400	10,41	75	175	150	0,38
500	16,50	86	190	224	0,45
600	25,26	103	193	304	0,51
700	40,03	122	203	375	0,54
800	62,59	146	206	448	0,56
900	108,20	154	208	538	0,60

Данные о распределении общего сопротивления исследуемых буронабивных конических свай на составляющие при осадке на 24 мм сведенцы в табл. 2. Несущая способность принята осреднённой для каждой из двух исследованных

типоразмеров свай. Приведенные данные показывают, что у сваи БКС-4,5-40/20 доля острия в общей несущей способности составляет 23 %, трения -43 %, отпора -34 %. У сваи БКС-4,5-60/20 распределение несколько иное - на острие приходится -17 %, трение -34 %, отпор -49 %.

Таблица 2 Результаты разделения сопротивления сваи при вдавливающей нагрузке на составляющие по боковой поверхности ствола и под нижним торцом (остриём)

Марка сваи	(Сопротивл	ение сваи,	кН			
	F _{общ}	$F_{\text{остр}}$	$F_{\text{трен}}$	F _{отп}	$F_{\text{остр}}/F_{\text{общ}}$	$F_{\text{трен}}/F_{\text{общ}}$	$F_{\text{отп/}}F_{\text{общ}}$
БКС-4,5-40/20	183	45	76	62	0,23	0,43	34
БКС-4,5-60/20	570	98	192	280	0,17	0,34	0,49

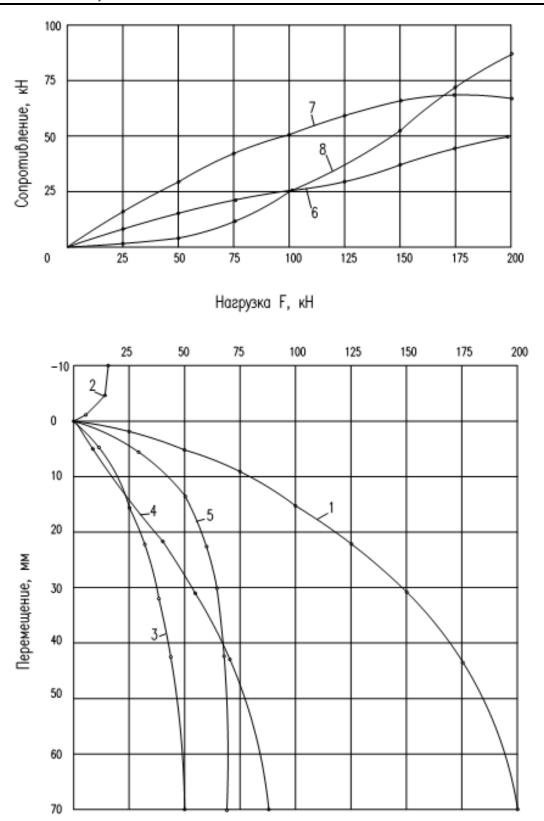


Рис. 7. Результаты исследований работы сваи БКС-4,5-40/20 при различных ступенях нагружения. График зависимостей: I — нагрузка — осадка сваи; 2 — нагрузка-выход сваи из грунта; 3 — осадка-сопротивление острия; 4 — осадка-отпор грунта; 5 — осадка-трение по стволу; 6 — нагрузка-сопротивление под остриём; 7 — нагрузка-сопротивление трения; 8 — нагрузка-сопротивление отпора.

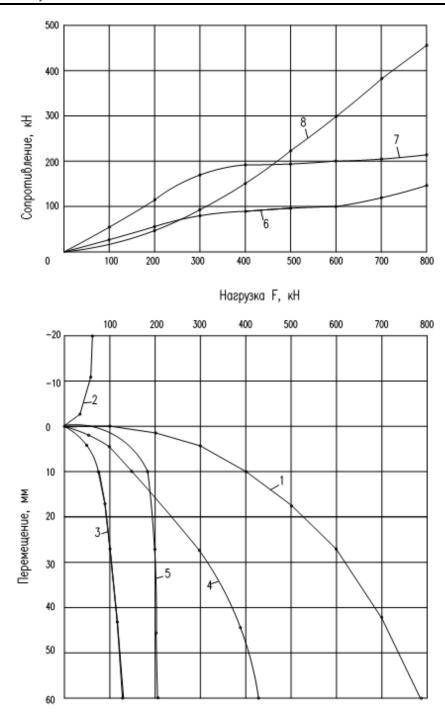


Рис. 8. Результаты исследований работы сваи БКС-4,5-60/20 при различных ступенях нагружения. График зависимостей: I — нагрузка — осадка сваи; 2 — нагрузка-выход сваи из грунта; 3 — осадка-сопротивление острия; 4 — осадка-отпор грунта; 5 — осадка-трение по стволу; 6 — нагрузка-сопротивление под остриём; 7 — нагрузка-сопротивление трения; 8 — нагрузка-сопротивление отпора

Выводы:

1. Проведенные тензометрические исследования работы натурных буронабивных конических свай позволили выявить, что в их несущей способности в значительной мере участвуют дополнительные силы нормального отпора грунта по наклонной боковой поверхности при её осадке под нагрузкой. Доля отпора грунта, в зависимости от угла конусности, составляет 34—49 % от общей несущей способности, сопротивление у

- острия 17–23 %, трения по боковой поверхности ствола 34–43 %. Этот вывод указывает на эффективность придания стволам буронабивных свай длиной до 5 M даже незначительной конусности в пределах 1,5°... 3,0°.
- 2. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики расчёта несущей способности буронабивных конических свай, а также дают основания на дальнейшее про-

должение исследований работы рассматриваемой конструкции в составе ленточных свайных фундаментов и фундаментов из кустов свай.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Дмоховский В.К. Курс оснований и фундаментов. Учебное пособие. М-Л.: Государственное издательство, 1927. 357 с.
- 2. Соколов Н.М. Руководство по изготовлению набивных частотрамбованных свай. М.: Госстройиздат, 1956. 48 с.
- 3. Дорошкевич Н.М., Клейн Г.К., Смиренкин П.П. Основания и фундаменты. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1972. 256 с.
- 4. Веселов В.А. Проектирование оснований и фундаментов. Учебное пособие. М.: Стройиздат, 1978. 215 с.
- 5. Денисов О.Г. Основания и фундаменты промышленных и гражданских зданий. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1968. 375 с.
- 6. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1981. 319 с.
- 7. Тетиор А.Н. Прогрессивные конструкции фундаментов для Урала и Тюменской области. Сверждловск: Средне-Уральское книжное издательство, 1971. 197 с.
- 8. Мангушев Р.А, Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии. Учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2010. 240 с.
- 9. Гнатюк В.И., Филппов К.Г. Влияние уширений ствола буронабивных свай на повышение их удельной несущей способности. Тезисы докладов научно-практической конференции «Прогрессивные конструкции фундаментов и методы производства работ по их устройству. Оренбург: Изд-во «Южный Урал», 1986. С. 51–53.
- 10.Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. М.: Стройиздат, 1988. 287 с.
- 11. Рекомендации по применению буроинъекционных свай. М.: Изд-во НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1984. 52 с.
- 12.Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.016-2011. Методические рекомендации по проектированию и устройству буронабивных свай повышенной несущей способности по грунту. М.: Изд-во Росавтодор, 1993. 49 с.
- 13.Глушков А.В., Хинкалин Л.А., Соколов Н.С., Глушков И.В., Сергеев С.А. Исследование

работы буронабивных свай с термохимическим уширением в основании // Современные науко-ёмких технологии, 2018. № 6. С. 55–61.

- 14. Технические рекомендации ТР 50-180-06. Проектирование и устройство свайных фундаментов, выполняемых по разрядно-импульсной технологии для зданий повышенной этажности (сваи РИТ). М.: Изд-во НИИМосстрой, 2006. 54 с.
- 15.Соколов Н.С., Рябинов В.М. Об эффективности устройства буроинъеционных свай с многоместными уширениями с использованием электроразрядной технологии // Геотехника. 2016. № 2. С. 28–32.
- 16. Моисеев Ю.Н. Выбор рациональных технологических схем устройства набивных конических свай в выштампованном ложе // Тезисы докладов областной научно-практической конференции «Эффективные конструкции фундаментов для промышленного и гражданского строительства в грунтовых условиях Оренбургской области. Оренбург: Изд-во «Южный Урал», 1984. С. 12–13.
- 17. Бойко Н.В., Кадыров А.С., Харченко В.В., Щелконогов В.Н. Технология, организация и комплексная механизация свайных работ. М.: Стройиздат, 1985. 303 с.
- 18. Рыбникова И.А., Рыбников А.М. Разработка конструкций буронабивных конических свай // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 2. С. 68–72.
- 19. Рыбникова И.А., Рыбников А.М. Анализ результатов натурных испытаний буронабивных конических свай на действие различных видов нагрузок // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. N 8 . С. 48–54.
- 20.Голли А.В. Методика измерения напряжений и деформаций в грунтах. Учебное пособие. Л.: Изд-во ЛИСИ, 1984. 53 с.
- 21. Фремке А.В. Электрические измерения. М.: Энергия, 1973. 424 с.
- 22. Баранов Д.С. Руководство по применению прямого метода измерения давлений в сыпучих средах и грунтах. М.: Изд-во ЦНИИСК, 1965. 147 с.
- 23. Рыбникова И.А., Рыбников А.М. Методика подготовки тензометрических исследований работы буронабивных конических свай // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. № 2. С. 55–61.

Информация об авторах

Рыбникова Ирина Александровна, старший преподаватель кафедры гуманитарных и естественнонаучных дисциплин. Е-mail: 7upa7@ mail.ru. Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. Россия, 353915, Новороссийск, Мысхакское шоссе ул., д. 75.

Рыбников Александр Михайлович, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных машин и комплексов. E-mail: a.ribnikov@novoroskhp.ru. Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. Россия, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, д. 93.

Поступила в октябре 2019 г.

© Рыбникова И.А., Рыбников А.М., 2020

¹Rybnikova I.A., ^{2,*}Rybnikov A.M.

Novorossiyskiy branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov State Maritime University named after adm. F.F. Ushakov *E-mail: a.ribnikov@novoroskhp.ru

ANALYSIS OF THE RESULTS OF TENSOMETRIC STUDIES OF NATURAL BORED CONICAL PILES

Abstract. Four bored piles of two standard sizes with a length of 4,5 m, a diameter of heads of 0,4 and 0,6 m, a diameter of the lower end of 0,2 m with a taper angle of $1^{\circ}20'$ and $2^{\circ}40'$, respectively, are studied. Two different types of piles are equipped with a height of four strain gauges, and two-ten bulldozers of five on each of the diagonal opposite sides. The soils on the experimental ground are composed of solid sandy loam. According to the measurements of strain gauges and load cell, plots of the distribution of forces and stresses in sections along the pile trunk, as well as plots of contact stresses along their lateral surface are constructed. The results of the research revealed that additional forces of soil repulsion along the inclined lateral surface during its sedimentation under load are significantly involved in the bearing capacity of bored conical piles. The proportion of soil resistance, depending on the angle of taper, is 34-49% of the total bearing capacity, the resistance of the lower end -17-23%, friction on the side surface of the trunk-34-43%. These data indicate the effectiveness of giving the trunks of bored piles up to 5 m even a slight taper in the range of $1,5^{\circ}...3,0^{\circ}$.

Keywords: bored pile, pile taper, bearing capacity, load cell, strain gauge, soil resistance, force plot, stress plot.

REFERENCES

- 1. Dmokhovsky V.K. Course of bases and foundations [Kurs osnovaniy i fundamentov]. Textbook-M-L.: State publishing house. 1927. 357 p. (rus)
- 2. Sokolov N.M. Guidelines for the production of printed customersbank piles [Rukovodstvo po izgotovleniyu nabivnykh chastotrambovannykh svay]. M.: Gosstroiizdat, 1956. 48 p. (rus).
- 3. Doroshkevich N.M., Klein G.K., Smirenkin P.P. Bases and foundations [Osnovaniya i fundamenty]. Textbook-Moscow: Higher school, 1972. 256 p. (rus)
- 4. Veselov V.A. Design of bases and foundations [Proyektirovaniye osnovaniy i fundamentov]. Textbook-M.: stroizdat, 1978. 215 p. (rus)
- 5. Denisov O.G. Bases and foundations of industrial and civil buildings [Osnovaniya i fundamenty promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy]. Textbook. Moscow: Higher school, 1968.375 p. (rus)
- 6. Dalmatov B.I. Mechanics of soils, bases and foundations [Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty]. Textbook for universities. Moscow: Stroizdat, 1981. 319 p. (rus)
- 7. Tetior A.N. Progressive designs of foundations for the Urals and Tyumen region [Progressivnyye konstruktsii fundamentov dlya Urala i Tyumenskoy oblasti]. Sverzhdlovsk: Sredne-

- uralskoe knizhnoe publishing house, 1971. 197 p. (rus).
- 8. Mangushev R.A., Ershov A.V., Osokin A.I. Modern pile technologies [Sovremennyye svaynyye tekhnologii]. Textbook-M.: Publishing house DIA, 2010. 240 p. (rus)
- 9. Gnatyuk V.I., Filppov K.G. Influence of barrel widenings of bored piles on increase of their specific bearing capacity [Vliyaniye ushireniy stvola buronabivnykh svay na povysheniye ikh udelnoy nesushchey sposobnosti]. Abstracts of reports of scientific-practical conference "Progressive designs of the bases and methods of production of works on their device. Orenburg: publishing house "Southern Ural", 1986. Pp. 51–53. (rus).
- 10.Konovalov P.A. Bases and foundations of reconstructed buildings [Osnovaniya i fundamenty rekonstruiruyemykh zdaniy]. M.: Sroizdat, 1988. 287 p. (rus)
- 11.Recommendations on the use of drill-injection piles [Rekomendatsii po primeneniyu buroinyektsionnykh svay] M.: Publishing house NIIOSP of N. M. Gersevanov, 1984. 52 p. (rus)
- 12.Industry road methodical document ODM 218.2.016-2011. Methodical recommendations on the design and installation of bored piles of increased bearing capacity on the ground [Metodicheskiye rekomendatsii po proyektirovaniyu i ustroystvu buronabivnykh svay povyshennoy nesushchey sposobnosti po gruntu] M.: Publishing house

Rosavtodor, 1993. 49 p. (rus)

13.Glushkov A.V., Khinkalin L.A., Sokolov N.S., Glushkov I.V., Sergeev S.A. Investigation of bored piles with thermochemical broadening in the base [Issledovaniye raboty buronabivnykh svay s termokhimicheskim ushireniyem v osnovanii]. Modern science-intensive technologies, 2018. No. 6. Pp. 55–61. (rus)

14.Technical recommendations TR 50-180-06. Design and installation of pile foundations, performed by discharge-pulse technology for highrise buildings (piles RIT) [Proyektirovaniye i ustroystvo svaynykh fundamentov. vypolnyayemykh po razryadno-impulsnoy tekhnologii dlya zdaniy povyshennoy etazhnosti (svai RIT)]. M.: Publishing house Niimosstroy, 2006. 54 p. (rus)

15. Sokolov N.S., Ryabinov V.M. On the efficiency of the device of bored piles with multi-seat widenings using electric discharge technology [Ob effektivnosti ustroystva buroinyetsionnykh svay s mnogomestnymi ushireniyami s ispolzovaniyem elektrorazryadnoy tekhnologii]. Geotechnika, 2016. No. 2. Pp. 28–32. (rus)

16.Moiseev Yu.N. The choice of rational technological schemes of the device printed tapered piles in the bed of wystepowaniem. [Vybor ratsionalnykh tekhnologicheskikh skhem ustroystva nabivnykh konicheskikh svay v vyshtampovannom lozhe]. Theses of reports of regional scientifically-practical conference "Efficient design of foundations for industrial and civil construction under the soil conditions of the Orenburg region Orenburg: Publishing house "Southern Ural", 1984. Pp. 12–13. (rus).

17. Boyko N.V., Kadyrov A.S., Kharchenko

V.V., Shchelkonogov V.N. Technology, organization and complex mechanization of pile works [Tekhnologiya, organizatsiya i kompleksnaya mekhanizatsiya svaynykh rabot] M.: Stroizdat, 1985. 303 p. (rus)

18.Rybnikova I.A., Rybnikov, A.M. Development of construction of bored tapered piles [Razrabotka konstrukcij buronabivnyh konicheskih svaj]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 2. Pp. 68–72. (rus)

19.Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. Analysis of the results of field testing of drilled conical piles on the action of different types of loads. [Analiz rezultatov naturnyh ispytanij buronabivnyh konicheskih svaj na dejstvie razlichnyh vidov nagruzok]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 8. Pp. 48–54. (rus)

20.Golly A.V. Methods of measurement of stress and strain in soils [Metodika izmereniya napryazheniy i deformatsiy v gruntakh]. Textbook. L.: Publishing house of LISI, 1984. 53 p. (rus)

21.France A.V. Electrical measurements [Elektricheskiye izmereniya]. Moscow: Energia, 1973. 424 p. (rus)

22.Baranov D.S. Guidelines for the use of direct pressure measurement method in bulk media and soils [Rukovodstvo po primeneniyu pryamogo metoda izmereniya davleniy v sypuchikh sredakh i gruntakh]. Moscow: Publishing house TSNIISK, 1965. 147 p. (rus)

23. Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. Methods for preparation of strain-gauge tests work bored tapered piles [Metodika podgotovki tenzometricheskih issledovanij raboty buronabivnyh konicheskih svaj]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 2. Pp. 55–61. (rus)

Information about the authors

Rybnikova, **Irina A.** Senior lecturer. E-mail: 7upa7@ mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Novorossiysk branch. Russia, 353915, Krasnodar region, Novorossiysk, Myshaksky highway str., 75.

Rybnikov, **Aleksandr M.** PhD, Assistant professor, Senior researcher. E-mail: a.ribnikov@novoroskhp.ru. State Maritime University named after admiral F.F. Ushakov. Russia, 353918, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin avenue, 93.

Received in October 2019

Для цитирования:

Рыбникова И.А., Рыбников А.М. Анализ результатов тензометрических исследований работы натурных буронабивных конических свай // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 44–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-44-55

For citation:

Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. Analysis of the results of tensometric studies of natural bored conical piles. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 44–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-44-55

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-56-61

*Юрьев А.Г., Зинькова В.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова *E-mail:yuriev ag@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРМ

Аннотация. Эффективный способ оптимизации нагружения металлических ферм имеет вариационную основу. Универсальный критерий оптимальности связан с минимумом потенциальной энергии системы (дополнительной энергии) в функциональном пространстве, расширенном за счет полей функций конфигурации и (или) модулей материала, а также нагрузки. При однородном линейно-упругом материале оптимальную ферму можно представить, как квазиравнопрочную систему с внутренними силами N_i/ω_i , где ω_i — коэффициент уменьшения расчетного сопротивления металла. Величина $\sum N_i l_i \ (l$ — длина стержня) является в общем случае характеристикой степени априорной устойчивости фермы, в частном случае (нагрузка на прямой, соединяющей опоры) определяет оптимальный вариант нагружения, соответствующий минимуму объема материала. В качестве численного эксперимента рассмотрено распределение нагрузки $\sum F_i$ =const для фермы с нисходящим (восходящим) раскосом. Установлена независимость оптимального варианта нагружения от структуры решетки фермы.

Ключевые слова: нагружение фермы, вариационная постановка задачи, критерий оптимальности.

Введение. Ферма – несущая часть инженерного сооружения (пролетного строения моста, перекрытия здания и т.п.), состоящая из шарнирно соединенных в узлах стержней. Фермы имеют давнюю историю и оправдывают себя рациональным использованием материала [1–13].

Оптимизацию конструкций ферм в результате рационального расположения их элементов впервые осуществил российский инженер В.Г. Шухов в конце XIX века [14]. Решение дано прежде всего на уровне топологии, которая предусматривает расположение узлов и способ их взаимного соединения для образования геометрически неизменяемой системы. Спустя восемь десятилетий появились исследования роли фактора топологии в оптимизации стержневых систем [15]. Но оставалась в стороне сопутствующая проблема – оптимизация их нагружения.

Основная часть. Для существенного прогресса в оптимизации несущих конструкций необходимо понимание того, что искомые топология, геометрия и сечения отдельных элементов системы составляют единство в алгоритме решения проектной задачи. Технические системы и природные конструкции должны быть подчинены единым принципам структурообразования, согласованным с критерием, имеющим энергетическое содержание. Эти принципы согласуются с

распределением материала в соответствии с силовыми полями, что соблюдается естественным образом в природных конструкциях [16].

Проблема приобретает специфику в отношении конструкций, для элементов которым необходимо обеспечить устойчивость равновесия. К ним относятся рассматриваемые здесь фермы [17–21].

Качество равновесия определяет потенциальная энергия системы П, в соответствии с которой различают:

- а) устойчивое состояние ($\Pi = \min, \delta^2 \Pi > 0$);
- б) неустойчивое состояние ($\Pi = \max, \delta^2 \Pi < 0$);
- в) безразличное состояние ($\Pi = \text{const}$, $\delta^2 \Pi = 0$) как граница между устойчивым и началом неустойчивого положения равновесия (критическое состояние).

Для ферм при вертикальной нагрузке некоторым эквивалентом степени априорной устойчивости может служить сумма произведений из усилий N в стержнях на их длины l. Покажем это на примере балочной фермы (рис. 1).

В табл. 1 даны размеры фермы, внутренние усилия и указанная характеристика.

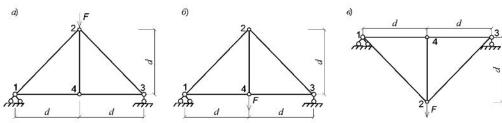


Рис. 1. Три варианта нагружения балочной фермы

Таблица 1

Сведения о фермах на рис. 1

Ферма	Стержни	l	N	Nl	ΣNl
	1-2	$d\sqrt{2}$	$-0.5\sqrt{2}F$	- Fd	
Рис. 1, а	2-3	$d\sqrt{2}$	$-0.5\sqrt{2}F$	- Fd	- <i>Fd</i>
	1-4	d	0,5F	0,5 <i>Fd</i>	7 67
	4-3	d	0,5F	0,5 Fd	
	2-4	d	0	0	
	1-2	$d\sqrt{2}$	$-0.5\sqrt{2}F$	- Fd	
Рис. 1, б	2-3	$d\sqrt{2}$	$-0.5\sqrt{2}F$	- Fd	0
	1-4	d	0,5F	0,5 <i>Fd</i>	·
	4-3	d	0,5F	0,5 <i>Fd</i>	
	2-4	d	F	Fd	
	1-2	$d\sqrt{2}$	$0.5\sqrt{2}F$	Fd	
Рис. 1, в	2-3	$d\sqrt{2}$	$0.5\sqrt{2}F$	Fd	Fd
	1-4	d	-0.5F	- 0,5 Fd	
	4-3	d	-0.5F	- 0,5 Fd	
	2-4	d	0	0	

Приведем сначала вывод из таблицы в формулировке [8]: для балочной фермы при вертикальной нагрузке алгебраическая сумма произведений из усилий в элементах на их длины будет положительна, равная нулю, или отрицательная, в зависимости от того, приложена ли нагрузка ниже прямой, соединяющей опорные точки, на уровне ее, или выше.

Установленный вывод используется в работе [8] для проверки правильности расчета усилий в случае приложения нагрузки на уровне прямой, соединяющей опорные точки, и основано на свойстве вириала внешних сил.

Но вывод из таблицы может иметь и другую интерпретацию: для балочной фермы при вертикальной нагрузке алгебраическая сумма произведений из усилий в элементах на их длины нарастает с увеличением степени априорной устойчивости, под которой будем понимать вклад растянутых стержней в величину ΣNl .

В первом случае — это 33 %, во втором — 50 %, в третьем — 67 %. Достигается это, как видим, соответствием расположения материала силовому полю. Во втором случае прежний «нулевой» стержень стал рабочим, в третьем растянутыми оказались длинные стержни. Однако окончательное суждение об оптимальности системы дает энергетический критерий.

Взяв за основу функционал Кастильяно, сформулируем вариационный принцип синтеза системы и нагрузки: «при заданных условиях дополнительная энергия в положении устойчивого равновесия достигает абсолютного минимума по внутренним силам в функциональном простран-

стве, расширенном за счет полей функций конфигурации и (или) модулей упругости материала, а также нагрузки.

Ограничимся рассмотрением фермы из однородного линейно-упругого материала с модулем продольной упругости E и расчетным сопротивлением растяжению и сжатию R. Представим виртуальную систему с внутренними силами N_i/ω_i , где ω_i — коэффициент уменьшения расчетного сопротивления R. Для растянутых стержней он равен единице, а для сжатых принимается исходя из ограничения гибкости элементов пояса и решетки. Искомые площади поперечных сечений A_i сжатых стержней должны иметь соответствующие минимальные радиусы инерции». [17]

При линейно-упругой постановке задачи дополнительная энергия системы равна потенциальной энергии деформации U. Рассмотрим изопериметрическую задачу, в которой предполагается заданным объем материала $\sum_{i=1}^{n} A_i l_i = V_0$, с функционалом

$$U_1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i^2 l_i}{2E\varphi_i^2 A_i} + \mu \sum_{i=1}^{n} A_i l_i$$
 (1)

где n — число стержней, μ — множитель Лагранжа, имеющий постоянную величину.

Следствием стационарности функционала (1) являются уравнение объема материала и n уравнений из условий $\partial U_1/\partial A_i = 0$:

$$-\frac{N_i^2}{2E\varphi_i^2 A_i^2} + \mu = 0$$
(2)

или

$$\frac{1}{2E} \frac{N_l^2}{\varphi_l^2 A_l^2} = \mu (= \text{const})$$
 (3)

Это свидетельствует о квазиравнонапряженности фермы. В работе [22] говорится о равнонапряженности, поскольку не рассматривается устойчивость сжатых стержней.

Исходя из условия квазиравнопрочности, можно записать:

$$A_i = \frac{|N_i|}{\varphi_i R},\tag{4}$$

и выражение U принимает вид:

$$U = \frac{R}{2E} \sum_{i=1}^{n} \frac{|N_i| l_i}{\varphi_i},\tag{5}$$

 $U=rac{R}{2E}\sum_{i=1}^{n}rac{|N_{i}|l_{i}}{arphi_{i}},$ (5) Найдя из (4) представим (5) как $|N_{i}|/arphi_{i}=$ A_iR

$$U = \frac{R^2}{2E} \sum_{i=1}^n A_i l_i, \tag{6}$$

Значит минимуму энергин U соответствует минимум объема материала.

В то же время, как видно из формулы (5) при φ_i = const минимуму энергии U соответствует минимум $\sum_{i=1}^{n} |N|_i l_i$, что может служить альтернативной характеристикой оптимальности конструкции фермы.

Для фермы на рис. 1 величина U составляет (коэффициент о принимается равным 0,5):

a)
$$2,5\frac{R}{E}$$
 Fd;
6) $3\frac{R}{E}$ Fd;

$$\delta$$
) $3\frac{R}{E}Fd$,

e)
$$2\frac{R}{E}$$
 Fd.

В варианте δ включение стержня 2-4 увеличило степень априорной устойчивости и в то же время повысило потенциальную энергию деформации по сравнению с вариантом а. Вариант в подтвердил свою оптимальность с позиции минимума величины U.

Рассмотрим оптимизацию расположения нагрузки $\Sigma F_i = const$ на примере балочной фермы (рис. 2).

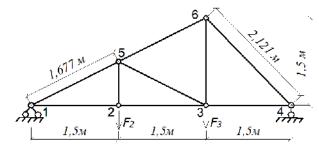


Рис. 2. Ферма с нисходящим раскосом

В табл. 2 приведены усилия в стержнях фермы при 5 вариантах нагрузки, составляющей в сумме 20 кН.

Таблица 2 Усилия (кН) в стержнях фермы (рис. 2) при 5 вариантах нагрузки

Стержень	F ₂ =10кH,	F ₂ =20кH,	F₂=0кH,	F ₂ =15кH,	F ₂ =5кH,
	$F_3 = 10 \text{ kH}$	F ₃ =0кН	F ₃ =20кН	F ₃ =5кН	F ₃ =15кН
1-2	20,00	26,67	13,33	23,33	16,67
2-3	20,00	26,67	13,33	23,33	16,67
3-4	10,00	6,67	13,33	8,33	11,67
4-6	-14,14	-9,43	-18,86	-11,79	-16,50
3-6	15,00	10,00	20,00	12,50	17,50
1-5	-22,36	-29,81	-14,91	-26,09	-18,63
5-6	-11,18	-7,45	-14,91	-9,32	-13,04
2-5	10,00	20,00	0,00	15,00	5,00
3-5	-11,18	-22,36	0,00	-16,77	-5,59

В табл. 3 даны величины $\sum |N_i| l_i$ и потенциальная энергия деформации U, соответствующие

2), вариантам нагрузки (табл. при $E=2,1\cdot10^5$ МПа и R=240МПа.

Таблица 3

Величины $\sum |N_i| l_i$ и потенциальная энергия деформации для 5 вариантов нагрузки

Величины	F ₂ =0кH,	F ₂ =5 _K H,	F ₂ =10кH,	F ₂ =15кH,	F ₂ =20кH,
	F ₃ =20кН	F ₃ =15кН	F ₃ =10кН	F₃=5кН	F ₃ =0ĸH
$\sum N_i l_i$, кН·м	180	195	210	225	240
<i>U.</i> Дж	154.3	167.1	180	192.8	205.7

Из табл. 3 видно, что оптимальным вариантом нагрузки, по энергетическому критерию, обеспечивающему минимальный расход материала, является расположение ее суммарной величины в узле 3, в котором сходятся три растянутых и одни «нулевой» стержень. Минимальной величине U соответствует минимум $\sum |N_i| l_i$, свидетельствующий, как говорилось выше, о степени априорной устойчивости системы. Эта характеристика может быть альтернативной минимуму величины U при выборе оптимального варианта рассмотренного типа нагрузки.

Для сравнения рассмотрим 5 вариантов нагружения фермы (рис. 3) с теми же геометрическими параметрами.

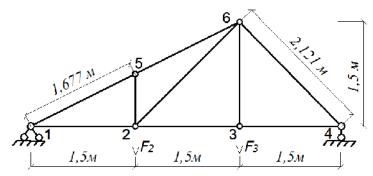


Рис. 3. Ферма с восходящим раскосом

В табл. 4 приведены усилия в стержнях фермы при 5 вариантах нагрузки, составляющей в сумме 20 кН.

Несмотря на изменение величин усилий по сравнению с табл. 2 в связи с изменением топологии фермы данные табл. 3 сохраняются. Это

свидетельствует о замечательном свойстве ферм с вертикальной нагрузкой по горизонтальному нижнему поясу — независимости потенциальной энергии деформации от структуры решетки.

Таблица 4 Усилия (кН) в стержнях фермы (рис. 3) при 5 вариантах нагрузки

Стержень	F ₂ =10кH,	F ₂ =20кH,	F ₂ =0кH,	F ₂ =15кH,	F₂=5кH,
	$F_3=10\kappa H$	F ₃ =0кН	F ₃ =20кН	F₃=5кН	$F_3=15\kappa H$
1-2	20,00	26,67	13,33	23,33	16,67
2-3	10,00	6,67	13,33	8,33	11,67
3-4	10,00	6,67	13,33	8,33	11,67
4-6	-14,14	-9,43	-18,86	-11,79	-16,50
3-6	10,00	0,00	20,00	5,00	15,00
1-5	-22,36	-29,81	-14,91	-26,09	-18,63
5-6	-22,36	-29,81	-14,91	-26,09	-18,63
2-5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2-6	14,14	28,28	0,00	21,21	7,07

Выводы. В заключение можно сказать, что оптимизация нагрузки на ферму решается сравнением приемлемых вариантов ее распределения. Определяющим фактором является критерий оптимальности для несущей конструкции, вытекающий из вариационного принципа проектной задачи и приводящий к минимуму расхода материала. В частном случае расположения нагрузки на уровне прямой, соединяющей опорные точки, альтернативным фактором может быть минимум сумм произведений из модулей усилий в элементах на их длины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Maxwell J.C. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames // The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. 1890. Vol. 2. Pp. 175–177.
- 2. Michell A.G.M. The limits of economy of material in framestructures // Philosophical Magasine and Jornal of Science. 1904. Vol. 8. sixth Series. No 47.
- 3. Pippard A.I.S. On a method for the direct design of framed structures having redundant bracing //

Tech. Rep. Aero. Res. Comn. London, for Year 1922–1923.

- 4. Подольский И.С. Пространственные фермы. М.: Гостехиздат, 1931. 351с.
- 5. Безухов Н.И. Внутренние силы и деформации ферм. М.-Л.: Госстройиздат, 1933. 164 с.
- 6. Рабинович И.М. К теории статически неопределимых ферм. М.: Транспечать, 1933. 120 с
- 7. Хуберян К.М. К расчету статически неопределимых ферм. Тбилиси: НИСоор, 1938. 82 с.
- 8. Уманский А.А. Статика и кинематика ферм. М.: ГИТТЛ, 1957. 342 с.
- 9. Киселев В.А. Строительная механика. М.: Стройиздат, 1976. 511 с.
- 10.Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Совершенствование структуры плоской фермы // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1. № 1. С. 71–76.
- 11.Марутян А.С., Оробинская В.Н. Оптимизация конструкций с решетками из круглых и овальных труб // Вестник МГСУ. 2016. № 10. С.45-57.
 - 12. Марутян А.С., Оробинская В.Н. Трех-

гранные фермы покрытий (перекрытий) и оптимизация их высот // Вестник МГСУ. 2017. Т.12. N 2. С. 172–183.

- 13. Дегтярь А.Н., Серых И.Р., Панченко Л.А., Чернышева Е.В. Остаточный ресурс конструкций зданий и сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 94–97.
- 14.Шухов В.Г. Строительная механика. Избранные труды. М.: Наука, 1977. 193 с.
- 15.Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes Butterworths, 1979. 238 p.
- 16.Roux W. Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen. Bd. 1-2. Leipzig, 1985
- 17.Юрьев А.Г. Оптимизация топологии и геометрии конструкций. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. 96 с.
- 18.3инькова В.А. Оптимизация топологии металлических ферм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С.37–40.

- 19.Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. No. 5. Vol. 10. Pp. 12391-12398.
- 20.Юрьев А.Г., Зинькова В.А., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Оптимизация структуры металлических ферм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 7. С.41–45.
- 21.Юрьев А.Г., Зинькова В.А., Ата Эль-Карим Солиман. Проектировочный расчет фермы // Строительные материалы и изделия. 2019. Т.2. №1. С.37–44.
- 22. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength // Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Techniques, 1960. Vol. 8. No. 6. Pp. 259–268.

Информация об авторах

Юрьев Александр Гаврилович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: yuriev_ag@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Зинькова Виктория Анатольевна, начальник отдела создания и оценки объектов интеллектуальной собственности, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: vikzinkova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в ноябре 2019 г.

© Юрьев А.Г., Зинькова В.А., 2020

*Yuriev A.G., Zinkova V.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov *E-mail:yuriev ag@mail.ru

LOADING OPTIMIZATION OF THE METAL TRUSSES

Abstract. Loading optimization of the metal trusses has a variational basis. The universal criterion of optimization is the minimum of potential energy of the system (additional energy) in functional space expanded at the expense of functions fields of configuration and (or) material modules, and load. Under the condition of homogeneous linear elastic material optimal truss represents as quasiuniresistant virtual system with internal forces N_i/ω_i (ω_i – decrease coefficient of designed metal resistance of to tension and compression. The value $\sum N_i l_i$ (l is pivot length) is in general case the characteristic of the degree of a priori stability of truss, in special case (the load at the line, connecting supports) determines optimal variant of loading. As numerical experiment was consider the distribution of load $\sum F_i$ =const for the truss with descending (ascending) pivot. It is established the independence of optimal loading variant from truss grating structure.

Keywords: truss loading, variational statement of problem, optimization criterion.

REFERENCES

- 1. Maxwell J.C. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames. The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. 1890. Vol. 2. Pp. 175–177.
- 2. Michell A.G.M. The limits of economy of material in framestructures. Philosophical Magasine
- and Jornal of Science. 1904. Vol. 8. sixth Series. No. 47.
- 3. Pippard A.I.S. On a method for the direct design of framed structures having redundant bracing. Tech. Rep. Aero. Res. Comn. London, for Year 1922–1923.

- 4. Podolsky I.S. Space trusses [Prostranstvennye fermy]. M.: Gostekhizdat, 1931. 351 p. (rus)
- 5. Bezukhov N.I. Interior forces and strains of trusses [Vnutrennie sily i deformacii ferm]. M.-L.: Gosstroyizdat, 1933. 164 p. (rus)
- 6. Rabinovich I.M. On the theory of statically undefinable trusses [K teorii staticheski neopredelimyh ferm]. M.: Transpechat, 1933. 120 p. (rus)
- 7. Khuberyan K.M. On calculation of statically undefinable trusses [K raschetu staticheski neopredelimyh ferm]. Tbilisi: NISoor, 1938. 82 p. (rus)
- 8. Umansky A.A. The statics and the kinematics of trusses [Statika i kinematika ferm]. M.: GITTL, 1957. 342 p. (rus)
- 9. Kiselyov V.A. Mechanics structure [Stroitel'naya mekhanika]. M.: Stroyizdat, 1976. 511 p. (rus)
- 10. Smolyago N.A., Yakovlev O.A. The structure perfecting of plane truss [Sovershenstvovanie struktury ploskoj fermy]. Journal of Science and Education of North-West Russia. 2015. Vol. 1. No. 1. Pp. 71–76. (rus)
- 11. Marutyan A.S., Orobinskaya V.N. Constructions optimization with the lattice from circle and oval tubes [Optimizaciya konstrukcij s reshetkami iz kruglyh i oval'nyh trub]. Vestnik MGSU. 2016. No. 10. Pp. 45–57. (rus)
- 12. Marutyan A.S., Orobinskaya V.N. Three-edged trusses of covering (overlapping) and the optimization o their heights [Trekhgrannye fermy pokrytij (perekrytij) i optimizaciya ih vysot]. Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12. No. 2. Pp. 172–183. (rus)
- 13. Degtyar A.N., Serykh I.R., Panchenko L.A., Chernysheva E.V. Residial resourse of buildings and structures constructions [Ostatochnyj resurs konstrukcij zdanij i sooruzhenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 94–97. (rus)

- 14. Shukhov V.G. Mechanics structure [Stroitel'naya mekhanika]. Selected works. M.: Science, 1977. 193 p. (rus)
- 15. Majid K.I. Optimum design of structures. London: Newnes Butterworths, 1979. 238 p.
- 16. Roux W. General consideration of organisms development mechanics. Vol. 1-2. Leipzig, 1985.
- 17. Yuriev A.G. The optimization of constructions topology and geometry [Optimizaciya topologii i geometrii konstrukcij]. Belgorod: BSTU Publisher, 2018. 96 p. (rus)
- 18. Zinkova V.A. Optimization of metallic trusses topology [Optimizaciya topologii metallicheskih ferm]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No. 2. Pp.37–40. (rus)
- 19. Zinkova V.A., Yuriev A.G., Peshkova E.V. Designing of tube trusses without gusset plate with joint connections. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. No. 5. Vol. 10. Pp. 12391–12398.
- 20. Yuriev A.G., Zinkova V.A., Smolyago N.A., Yakovlev O.A. Structure optimization of metallic trusses [Optimizaciya struktury metallicheskih ferm]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 7. Pp. 41–45. (rus)
- 21. Yuriev A.G., Zinkova V.A., Ata El-Carim Soliman. Designing calculation of the truss [Proektirovochnyj raschet fermy]. Construction materials and products. 2019. Vol. 2. No. 1. Pp. 37–44. (rus)
- 22. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength. Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Techniques, 1960. Vol. 8. No. 6. Pp. 259–268.

Information about the authors

Yuriev, Alexandr G. DSc, Professor. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zinkova, Viktoriya A. Senior lecturer. E-mail: olga.koalchenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in November 2019

Для цитирования:

Юрьев А.Г., Зинькова В.А. Оптимизация нагружения металлических ферм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 56–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-56-61

For citation:

Yuriev A.G., Zinkova V.A. Loading optimization of the metal trusses. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 56–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-56-61

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-62-71

Алексеев Ю.В., *Перекопская М.А.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет *E-mail: mappi25@yandex.ru

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЕРРИТОРИЙ С РАЗВИТЫМ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ (НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)

Аннотация. Рассмотрена проблема оценки градостроительного потенциала территорий лесопромышленного комплекса Архангельской области, обусловленная условиями, особенностями и спецификой размещения поселений и производств; даны предложения по совершенствованию их территориально-пространственной организации.

Сложившаяся система размещения и взаимосвязи поселений и производств в существующих территориальных границах Архангельской области не отвечает новым фактам и данным, обусловленным особенностями технологического процесса заготовки, обработки древесины, лесовосстановления и последовательности их выполнения.

Для обеспечения жизнедеятельности данных поселений и производств, территорию лесопромышленного комплекса предложено рассматривать в виде системы градостроительных ареалов, границы которых обусловлены потенциалом лесных участков, являющихся сырьевой базой для предприятий; системой предприятий по заготовке, обработке и переработке древесины; территориями муниципальных районов, поселений и наличием в них трудовых ресурсов, с учетом особенностей функциональных процессов, функций, факторов, характерных при планировании поселений и производств в Архангельской области.

Установление границ градостроительного ареала при планировании поселений, производств Архангельской области обеспечит проведение обоснованных мероприятий по их территориально-пространственной организации и размещению в соответствии с современными условиями и требованиями.

Ключевые слова: градостроительный ареал лесопромышленного комплекса, территориальное планирование, ресурсный потенциал.

Введение. Оценка размещения и эффективного градостроительного использования территорий лесопромышленного комплекса требует учета функционально-технологических особенностей, специфики, взаимосвязи и последовательности процессов заготовки, обработки древесины, лесовосстановления, и территориального размещения производств.

Особенности и специфика территорий лесопромышленного комплекса, его эффективность и устойчивость определяется взаиморасположением участков сырьевой базы, предприятий лесозаготовки, предприятий по механической и химической обработке древесины, ресурсным потенциалом лесных участков, транспортными связями, системой расселения и размещением потребителей.

Основой производственного и социального развития территорий лесопромышленного комплекса являются лесные ресурсы. На территории России располагается более четверти мировых запасов древесной биомассы. Однако, имеющийся сырьевой потенциал не рационально используется в лесопромышленном комплексе изза отсутствия сбалансированной градостроительной политики, способствующей активизации лесной и торговой политики.

Для совершенствования градостроительной политики необходимы научно-проектные и организационные мероприятия, обеспечивающие структурную реорганизацию сложившихся условий функционирования территорий лесопромышленного комплекса с учетом возможностей их территориально-пространственной трансформации.

Методология. При проведении исследования использовался системный анализ проблемы градостроительного освоения территории лесопромышленного комплекса, позволивший оценить в его иерархической системе сложные производственно-технологические связи, обосновать подходы к размещению предприятий и поселений лесопромышленного комплекса при территориальном планировании.

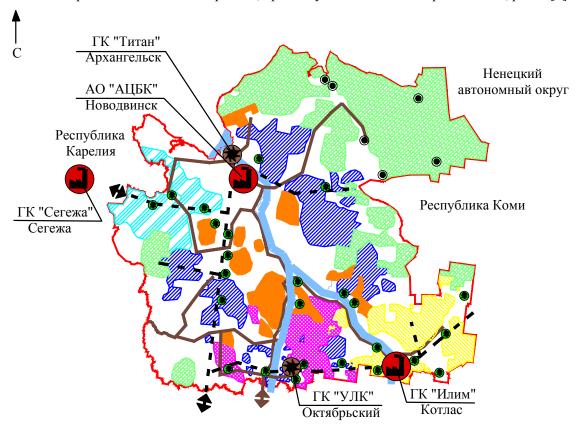
Основная часть. Одним из факторов, определяющих эффективность и устойчивость лесопромышленного комплекса, является ресурсный потенциал лесных участков [1].

Для Архангельской области характерна высокая лесистость территории (72 %), преимущественно с хвойными древостоями. Общая площадь земель лесного фонда составляет 28 362 тыс. га, а общий запас древесины на корню — 2572,9 млн.куб.м. Хвойные насаждения составляют 80,2% от покрытой лесом площади, лиственные – 19,8% [2].

Количественные и качественные характеристики древесного сырья Архангельской области, его ресурсный потенциал, соответствуют потребностям существующих предприятий по обработке и переработке древесины и обеспечивают расширение объемов производства пиломатериалов, фа-

неры и плит путем строительства новых мощностей. Такое положение предусмотрено Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [3].

Однако, для предприятий лесопромышленного комплекса Архангельской области характерна неравномерность, разрозненность и удаленность участков их лесосырьевой базы, рис. 1 [4].



Вологодская область

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Рис. 1. Предприятия лесопереработки и лесосырьевые базы Архангельской области

Существующие границы градостроительных ареалов лесопромышленных комплексов схематично отображены на рис. 2.

Лесозаготовительная деятельность преимущественно ведётся на территориях Архангельской области, примыкающих к транспортным пу-

тям [4] и приближенных к предприятиям по механической переработке древесины и целлюлозно-бумажной промышленности, рис. 1.

Основные предприятия по механической переработке древесины расположены в Архангельске, а предприятие целлюлозно-бумажной промышленности — в Новодвинске, рис. 3.

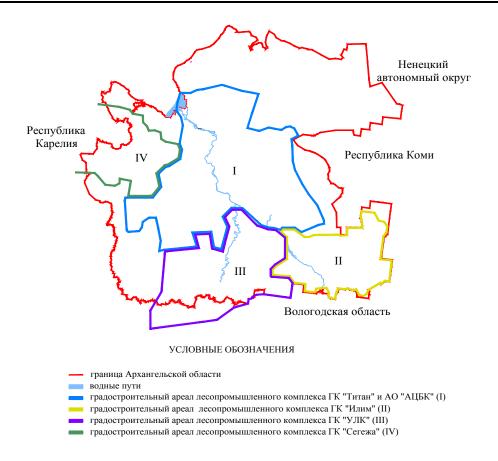


Рис. 2. Схема градостроительных ареалов лесопромышленных комплексов Архангельской области

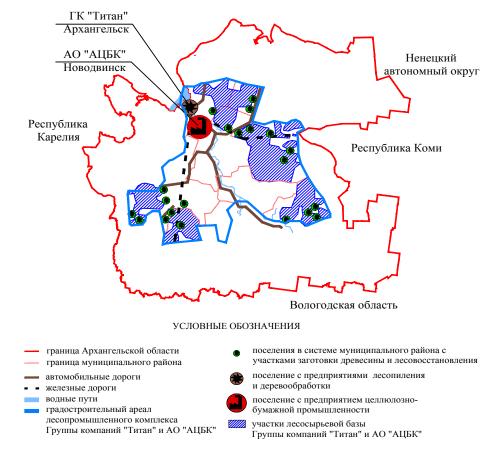


Рис. 3. Размещение предприятий лесопереработки и участков лесосырьевой базы в ареале I

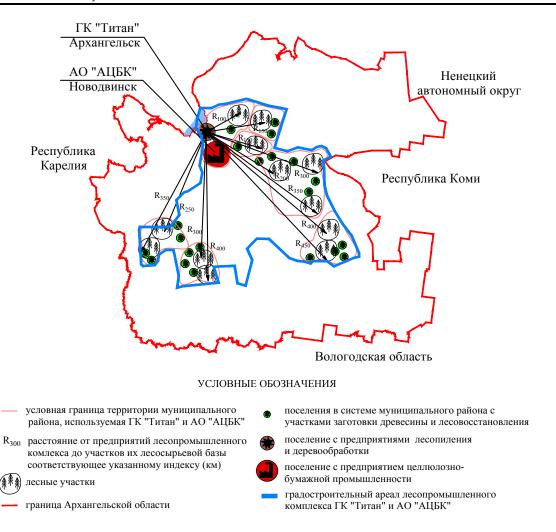


Рис. 4. Схема размещения участков лесосырьевой ГК «Титан» и АО «АЦБК»

На долю этих предприятий деревопереработки приходится до 60 % всей перерабатывающей промышленности Архангельской области [5]. Предприятия ГК «Титан» и АО «АЦБК» размещены вблизи водных путей снабжения древесиной лесоперерабатывающих производств. Изначально данные предприятия снабжались сырьем с прибрежных лесных участков путем сплава сырья по реке Северная Двина. В настоящее время сырьё данным предприятиям преимущественно поставляют по железной дороге с делянок, расположенных на западе региона (рис. 4), и по автомобильным дорогам.

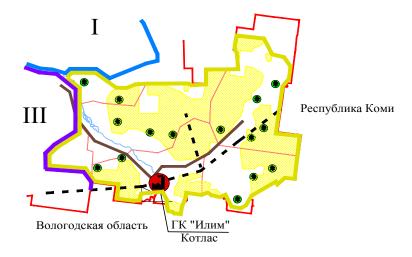
Предприятия по переработке древесины в Архангельске и Новодвинске обеспечены трудовыми ресурсами, энергетической инфраструктурой и портовыми мощностями для экспорта продукции. Однако, из-за активной вырубки леса в предшествующие года, особенно хвойных пород, лесной фонд на территориях, прилегающих к данным предприятиям, истощён [4], что создает определённые ограничения для дальнейшего их развития.

Вторым по значимости является предприятие целлюлозно-бумажной промышленности ГК Илим», на долю которого приходится до 35 % всего объёма переработки древесины в Архангельской области (рис. 5) [5].

Данное предприятие размещено вблизи сырьевой базы (рис. 6), снабжается древесным сырьём по водному пути, по железной дороге и по автомобильным дорогам [5], обеспечено трудовыми ресурсами, энергетической инфраструктурой.

На долю третьего по значимости деревообрабатывающего комплекса, лесопильного производства ГК «УЛК», приходится 15 % объёма переработки древесины в Архангельской области [5]. Лесопильные производства ГК «УЛК» снабжаются древесным сырьем по железной и автомобильным дорогам (рис. 7) и приближены к сырьевой базе (рис. 8).

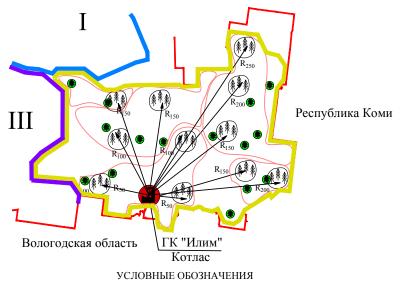
Часть древесного сырья Архангельской области вывозится в Республику Карелия [6], для снабжения расположенного в городе Сегежа перерабатывающего комплекса ГК «Сегежа», рис. 7.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ



Рис. 5. Размещение предприятия лесопереработки и участков лесосырьевой базы ГК «Илим»



условная граница территории муниципального района, используемая Группой компаний "Илим"
 R₃₀₀ расстояние от предприятий лесопромышленного комлекса до участков их лесосырьевой базы соответствующее указанному индексу (км)
 граница Архангельской области
 градостроительный ареал лесопромышленного комплекса ГК "Титан" и АО "АЦБК" (I)
 градостроительный ареал лесопромышленного комплекса ГК "Илим" (II)
 градостроительный ареал лесопромышленного комплекса ГК "УЛК" (III)

Рис. 6. Схема размещения участков лесосырьевой ГК «Илим»

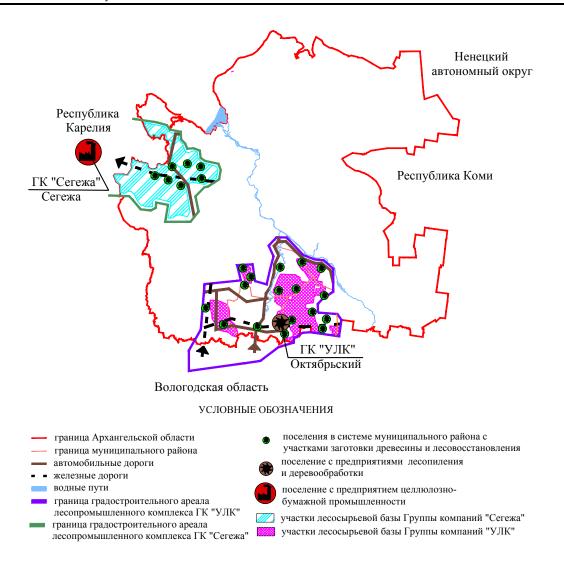


Рис. 7. Размещение предприятий лесопереработки и участков лесосырьевой базы ГК «УЛК» и ГК «Сегежа»

Спецификой территорий, в местах активного освоения лесного фонда Архангельской области в предшествующие годы, является высокая концентрация поселений и разрозненность оставшихся лесных участков сырьевой базы. Поэтому в целях удовлетворения потребностей предприятий лесопромышленного комплекса в древесине, в соответствии с Лесным планом Архангельской области до 2025 года [2] планируется эксплуатация лесов в северо-восточной и восточной ее частях. Однако, лесные участки в северо-восточной части Архангельской области являются низкопродуктивными с невысоким запасом древесины [7], не имеют транспортной доступности и значительно удалены от предприятий по переработке древесины, рис.1.

Сложившаяся интенсивность лесопользования, определяемая величиной потребности в древесине перерабатывающих предприятий лесопромышленного комплекса Архангельской области, проблемы и взаимосвязи с ресурсным потен-

циалом, требуют изменения системы организации производства, формирования и использования участков сырьевой базы.

Для разработки такой системы необходим обоснованный прогноз функционирования лесопромышленного комплекса [8], для выполнения которого требуется формализованная информация о размещении:

- лесных участков, являющихся сырьевой базой для предприятий лесопромышленного комплекса;
- системы предприятий по заготовке, обработке и переработке древесины;
 - территорий поселений;
- инфраструктуры, обеспечивающей их транспортными, энергетическими и социальными связями.

Формализовать взаимосвязь поселений, производств и природного комплекса в лесопромышленном комплексе возможно в структуре градостроительного ареала [9, 10].



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

условная граница территории муниципального района, используемая Группой компаний "УЛК" R₃₀₀ расстояние от предприятий лесопромышленного комлекса до участков их лесосырьевой базы соответствующее указанному индексу (км) лесные участки поселение с предприятиями лесопиления и деревообработки граница градостроительного ареала лесопромышленного комплекса ГК "УЛК" граница Архангельской области

Рис. 8. Схема размещения участков лесосырьевой ГК «УЛК»

В границах ареала, сформированного с учетом особенностей и специфики его территории будет выполнена оценка:

- хозяйственного использования участков сырьевой базы, подвергнутых ранее антропогенному воздействию, имеющих транспортную доступность, и максимально приближенных к перерабатывающим предприятиям лесопромышленного комплекс;
- взаимосвязь временного фактора, параметров территориально-пространственных характеристик сырьевых участков и объемов заготовки древесины, имеющих ярко выраженную цикличность.

Временной фактор лесозаготовок и их технологии определяют территориально-пространственную емкость участков сырьевой базы лесопромышленного комплекса [11], оценка характеристик которой выполняется в процессе учета особенностей и специфики планируемых к использованию территорий природного комплекса, размещения предприятий лесопиления и переработки древесины. При этом каждый цикл включает в себя рубку и последующее восполнение вырубленных лесных ресурсов [7]. Процесс восстановления и накопление древесных ресурсов достаточно длительный (около 100 лет) и зависит во многом от климатических и эдафических факторов.

Оценка особенностей и специфики технологического процесса заготовки, обработки древесины, последовательности его осуществления,

влияет на размещение предприятий целлюлознобумажной, деревообрабатывающей и лесохимической промышленности в градостроительном ареале лесопромышленного комплекса. Предприятия могут располагаться в непосредственной близости к участкам сырьевой базы, или в местах сосредоточения трудовых ресурсов, обеспеченных инженерной инфраструктурой.

На структуру и формирование границ градостроительного ареала влияют, во-первых, требования, предъявляемые к качественным и количественным характеристикам древесного сырья, интенсивности лесопользования, транспортной доступности, со стороны предприятий лесопиления и переработки древесины. Во-вторых, оптимальные расстояния для доставки и перераспределения сырья. Выполнение комплекса данных взаимосвязанных требований обуславливает разработку модели структурной организации градостроительного ареала [12], обеспечивающей минимизацию расстояний между предприятиями по заготовке древесины и ее обработке древесин, и перераспределению между данными предприятиями балансового сырья и отходов производства.

Выводы. Изменение требований к формированию и размещению территорий сырьевой базы и предприятий лесопромышленного комплекса, с целью поддержания их жизнеспособности, обеспечения непрерывного функционирования, а также сохранения устойчивого развития сложившихся поселений, обуславливает реализацию

градостроительной политики, основанной на координации и организации участников градостроительной деятельности, соответствии объективным условиям планирования поселений и производств.

К таким условиям относятся:

- установление территориальной емкости участков сырьевой базы лесопромышленного комплекса с учетом продолжительности одного цикла лесозаготовки, технологии лесопользования, климатических и эдафических факторов, интенсивности заготовки древесины;
- обоснование подхода к формированию границ градостроительного ареала лесопромышленного комплекса;
- разработка модели территориально-пространственной организации и размещения участков сырьевой базы лесопромышленного комплекса, с учетом особенностей и специфики функционирования предприятий по заготовке, обработке и переработке древесины, сложившихся поселений в границах градостроительного ареала лесопромышленного комплекса (ГАЛК).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Майорова Л.П. Рациональное использование древесного сырья как эколого-химическая основа функционирования лесопромышленного комплекса (на примере Хабаровского края): автореферат на соискание уч. ст. докт. хим. наук. Владивосток, 2011. 43 с.
- 2. Лесной план Архангельской области [Электронный ресурс] Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://dvinaland.ru (дата обращения: 02.04.2019).
- 3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20.09.2018 № 1989-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» [официальный текст]. URL: http://www.pravo.gov.ru (дата обращения: 29.11.2019).
- 4. Лесохозяйственные регламенты лесничеств Архангельской области [Электронный ресурс] Систем. требования: AdobeAcrobatReader.

- URL: https://dvinaland.ru (дата обращения: 29.11.2019).
- 5. Схема территориального планирования Архангельской области [Электронный ресурс] Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://dvinaland.ru (дата обращения: 29.11.2019).
- 6. Perekopskaya M., Alekseev Y. Timber industry and forest environmental resources of the North-West Federal District of Russia // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 110. [Электронный ресурс] Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911002006 (дата обращения: 29.11.2019).
- 7. Карпачевский М.Л., Тепляков В.К., Яницкая Т.О., Ярошенко А.Ю. Основы устойчивого лесоуправления. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2009. 143 с.
- 8. The European Forest Sector Outlook Study II 2010-2030. Geneva, 2011. 111 р. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/29153022 (дата обращения: 29.11.2019).
- 9. Алексеев Ю.В. Эволюция градостроительного планирования поселений. Т. 1: Общие представления о градостроительстве, промышленная революция, индустриальное производство. М.: Изд-во АСВ, 2014. 368 с.
- 10. Самойлова Н.А. Особенности учета территориально-строительного ресурса территорий, формирование которых связано с добычей полезных ископаемых // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2019. № 3. С. 61–65.
- 11. Jonsson R., Egnell G., Baudin A. Swedish forest sector outlook study. Geneva, 2011. 100 р. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.unece.org/forests/publications (дата обращения: 29.11.2019).
- 12. Алексеев Ю.В., Самойлова Н.А. Подход к организации градостроительного планирования территории угольного бассейна // Архитектура и строительство России. 2015. № 8. С. 30–39.

Информация об авторах

Алексеев Юрий Владимирович, доктор архитектуры, профессор кафедры градостроительства Института строительства и архитектуры. E-mail: alekseev-grado@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Перекопская Марина Алексеевна, аспирант кафедры градостроительства Института строительства и архитектуры. E-mail: mappi25@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила в декабре 2019 г.

© Алексеев Ю.В., Перекопская М.А., 2019

Alekseev Y.V., *Perekopskaya M.A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering *E-mail: mappi25@yandex.ru

APPROACH TO THE ASSESSMENT OF TERRITORIES WITH A DEVELOPED FORESTRY COMPLEX (ON THE EXAMPLE OF THE ARKHANGELSK REGION)

Abstract. The problem of assessing the urban development potential of the territories of the timber industry complex of the Arkhangelsk region, due to the conditions, features and specifics of the location of settlements and industries is considered; suggestions for improving their spatial organization are given.

The existing system of placement and the relationship of settlements and industries within the existing territorial borders of the Arkhangelsk region does not meet new facts and data due to the features of the technological process of harvesting, woodworking technologies, reforestation and the sequence of their implementation.

To ensure the vital activity of these settlements and industries, it is proposed to consider the territory of the timber industry complex in the form of a system of urban development areas. Their boundaries are determined by the potential of forest plots, which are the raw material base for enterprises; by a system of enterprises for wood harvesting, woodworking and processing of wood; by territories of municipal districts, settlements and the availability of labor resources within these districts, the specifics of functional processes, functions, factors characteristic of the planning of settlements and industries in the Arkhangelsk region being taken into account.

The establishment of the boundaries of the urban development area while planning the settlements and industries in the Arkhangelsk region will provide reasonable measures for their territorial and spatial organization and placement in accordance with modern conditions and requirements.

Keywords: urban planning area of the timber industry, territorial planning, resource potential.

REFERENCES

- 1. Mayorova L.P. The rational use of wood raw materials as the ecological and chemical basis for the functioning of the timber industry (on the example of the Khabarovsk Territory) [Ratsional'noye ispol'zovaniye drevesnogo syr'ya kak ekologokhimicheskaya osnova funktsionirovaniya lesopromyshlennogo kompleksa (na primere Khabarovskogo kraya)]. Vladivostok, 2011. 43 p. (rus)
- 2. Forest Plan of the Arkhangelsk Region [Lesnoy plan Arkhangel'skoy oblasti]. AdobeAcrobatReader. URL: https://dvinaland.ru (date of treatment: 02.04.2019). (rus)
- 3. Order of the Government of the Russian Federation of September 20, 2018 No. 1989-r "On Approving the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030" [Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Ros-Federatsii 2030 sivskov do godal URL: http://www.pravo.gov.ru (date of treatment: 29.11.2019). (rus)
- 4. Forestry regulations of forestries of the Arkhangelsk region [Lesokhozyaystvennyye reglamenty lesnichestv Arkhangel'skoy oblasti] AdobeAcrobatReader. URL: https://dvinaland.ru (date of treatment: 29.11.2019). (rus)
- 5. The territorial planning scheme of the Arkhangelsk region [Skhema territorial'nogo planirovaniya Arkhangel'skoy oblasti] AdobeAcrobatReader. URL: https://dvinaland.ru (date of treatment: 29.11.2019). (rus)

- 6. Perekopskaya M., Alekseev Y. Timber industry and forest environmental resources of the North-West Federal District of Russia. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 110. AdobeAcrobatReader. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911002006 (date of treatment: 29.11.2019).
- 7. Karpachevsky M.L., Teplyakov V.K., Yanitskaya T.O., Yaroshenko A.Yu. Fundamentals of sustainable forest management [Osnovy ustoychivogo lesoupravleniya]. Moscow: WWF, 2009. 143 p. (rus)
- 8. The European Forest Sector Outlook Study II 2010-2030. Geneva, 2011. 111 p. AdobeAcrobatReader. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/29153022 (date of treatment: 29.11.2019).
- 9. Alekseev Yu.V. The evolution of urban planning of settlements [Evolyutsiya gradostroitel'nogo planirovaniya poseleniy]. Vol 1. General ideas about urban planning, industrial revolution, industrial production [Obshchiye predstavleniya o gradostroitel'stve, promyshlennaya revolyutsiya, industrial'noye proizvodstvo]. Moscow: Publishing House "ACB", 2014. 368 p.
- 10. Samoilova N.A. Features of the account of the territorial construction of online territories, the formation of which is associated with mining. Natural and technogenic risks. Safety of structures. 2019. No. 3. Pp. 61–65.
- 11. Jonsson R., Egnell G., Baudin A. Swedish forest sector outlook study. Geneva, 2011. 100 p. AdobeAcrobatReader. URL: http://www.unece.org/forests/publications (date of treatment: 29.11.2019)

12. Alekseev Yu.V., Samoilova N.A. Approach to urban planning of the coal basin. Architecture and Construction of Russia. 2015. No. 8. Pp. 30–39.

Information about the authors

Alekseev, Yuri V. DSc, Professor. E-mail: alekseev-grado@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye sh., 26.

Perekopskaya, Marina A. Postgraduate student. E-mail: mappi25@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye sh., 26.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Алексеев Ю.В., Перекопская М.А. Подход к оценке территорий с развитым лесопромышленным комплексом (на примере Архангельской области) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 62–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-62-71

For citation:

Alekseev Y.V., Perekopskaya M.A. Approach to the assessment of territories with a developed forestry complex (on the example of the Arkhangelsk region). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 62–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-62-71

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-72-84

Петрусенко Ю.В

Южный Федеральный Университет. Академия архитектуры и искусств E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru

ЛЕЧЕБНЫЕ УЧРЕЖДЕНИЯ В ТВОРЧЕСТВЕ АРХИТЕКТОРА НИКОЛАЯ МАТВЕЕВИЧА СОКОЛОВА. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Аннотация. В данной статье рассматриваются лечебные учреждения — Николаевская городская больница в г. Ростове-на-Дону и комплекс городской больницы в г. Азове, построенные по проекту городского архитектора конца XIX — начала XX века Николая Матвеевича Соколова. Соколов является представителем рационального направления архитектуры XIX века. В статье решается проблема определения в этих произведениях общих тенденций, свойственных архитектуре рубежа XIX-XX веков, а также особенностей творчества Н.М. Соколова. Производится поиск и выявление аналогов лечебных учреждений, архитектура которых повлияла на внешний и внутренний облик рассматриваемых объектов. Определяются также основные условия проектирования, значение объектов в исторической застройке. Цель исследования - выявление особенностей творческого метода мастера на примере проектирования лечебных учреждений. В статье раскрываются неизвестные факты творческой деятельности Николая Матвеевича Соколова, вводятся новые фактологические данные, систематизирована информация о творческом наследии архитектора. Проведен сравнительный анализ исследуемых объектов и известных примеров больничной архитектуры конца XIX — начала XX веков, выявлены черты сходства и особенности произведений Н.М. Соколова.

Ключевые слова: архитектура конца XIX – начала XX века, творческий метод архитектора, лечебные учреждения, Н.М. Соколов, Николаевская городская больница, г. Ростов-на-Дону, комплекс городской больницы, г. Азов.

Введение. Данная статья посвящена рассмотрению и сравнению лечебных учреждений: Николаевской городской больницы г. Ростована-Дону и комплекса городской больницы в г. Азове, построенных по проекту городского архитектора конца XIX - начала XX века Николая Матвеевича Соколова. Решается проблема определения в этих произведениях общих тенденций, свойственных архитектуре рубежа XIX – XX веков, а также особенностей творчества Н.М. Соколова. Цель исследования - выявление особенностей творческого метода мастера на примере проектирования лечебных учреждений. В статье раскрываются неизвестные факты творческой деятельности Николая Матвеевича Соколова, вводятся новые фактологические данные, систематизирована информация о творческом наследии архитектора. Проведен сравнительный анализ исследуемых объектов и известных примеров больничной архитектуры конца XIX - начала XX веков, выявлены черты сходства и особенности произведений Н.М. Соколова. Проблемная ситуация заключается в определении общих тенденций, рассматриваемых лечебных учреждений, присущих архитектуре рубежа XIX-XX веков, а также особенностей творчества Н.М. Соколова.

Данная тема актуальна в современных условиях в связи с возникшим интересом к историческому наследию региональной архитектуры и с расширением процессов реконструкции и нового

строительства в условиях исторического центра города.

На рубеже конца XIX – начала XX века Николай Матвеевич Соколов был городским архитектором Ростова-на-Дону и внес огромный вклад в историю развития архитектуры города. Его сохранившиеся объекты, продолжают занимать важное место в облике исторического центра Ростова-на-Дону. Среди нескольких десятков крупных реализованных проектов мастера особое место занимают комплексы больниц в Ростове-на-Дону и Азове. Данные о биографии Николая Матвеевича Соколова частично содержатся в юбилейном сборнике сведений о деятельности бывших воспитанников Института гражданских инженеров. В нем говорится, что Соколов родился в 1859 году, начальное и среднее образование получил в Пинском и Виленском реальном училище, в период с 1880 г. по 1885 г. обучался в Институте гражданских инженеров, «был выпущен по первому разряду с настоящим званием». В 1886г. в Ростове-на-Дону занимает место городского техника с правами государственной службы, с 1887 г. по 1906 г. являлся городским архитектором второго участка города Ростова-на-Дону [1, с. 321–322]. «Второй участок» включал в себя тогда район Богатого колодезя, торгового порта, Нового базара, Покровской площади, больницы Красного креста и др. [2]. В ходе обучения Соколова в Институте Гражданских инженеров на формирование творческого метода архитектора оказала влияние архитектурно-пространственная среда Петербурга, а также творчество преподавателей ИГИ — мастеров рационального направления зодчества XIX века — И.С. Китнера и В.А. Шретера [3].

Методология. Основными методами исследования являются архивные поиски; фотофиксация; визуальный и объемно-планировочный анализ объектов; сравнительный анализ; обобщение уже известных материалов; изучение общей и специальной литературы; выявление новых документов в разных проектных организациях, архивах и музейных фондах.

Основная часть. В качестве ближайшего прототипа больниц, спроектированных Н.М. Соколовым, можно рассмотреть ансамбль Александровской барачной больницы им. С.П. Боткина в городе Санкт-Петербурге, построенной по проекту однофамильца Соколова Д.Д., позже больница достраивалась И.С. Китнером — преподавателем и наставником Н.М. Соколова и Покровской больницы на Васильевском острове архитекторы Штегеман Г.Х., Виндельбандт В.В., Кох К.К.

Начало строительства Александровской барачной больницы им. С.П. Боткина в городе Санкт-Петербурге 1880–1881 гг – инженер-архитектор Соколов Д.Д., позже достраивал Китнер И.С. - 1909-1910. 17 апреля 1882 года в Санкт-Петербурге был открыт первый стационар, специализирующийся на лечении инфекционных заболеваний. По инициативе терапевта Ю.Т. Чудовского была создана больница на основе барачной системы. Проект больничного городка на 300 коек разрабатывал инженер-архитектор Д.Д. Соколов согласно генеральному плану. Больница была расположена Александровском (Казачьем) плацу. Александровская барачная больница была размещена в двадцати двух типовых барачных зданиях. Двадцать зданий бараков были предусмотрены для размещения больных, страдающих одним и тем же недугом, в двух остальных размещались люди, идущие на поправку. Больные с неустановленным диагнозом - в отдельном здании. Вся территория больницы имела четкое зонирование согласно функциональному назначению и степени «заразности». В ходе устройства больницы было предусмотрено инженерно-техническое оснащение, такое как вентиляция, отопление, освещение, обеззараживание стоков. Территория больницы предусматривала размещение собственных хозяйственно-бытовых зданий и помещений. По просьбе городской думы попечителем больницы стал С.П.Боткин. В 1889 г. в память о С.П.Боткине больнице было присвоено его имя [4]. Александровская барачная больница

им. С.П.Боткина была первой в России, применившей для перевозки инфекционных больных санитарную карету. В 1883 г. была открыта первая дезинфекционная камера в Петербурге [5, С.93]. С 1881 г. в Александровской (Боткинской) больнице действовала деревянная (с 1914 каменная) часовня св.Александра Невского [6, С.46]. В период революции и гражданской войны больница пришла в упадок.

Александровская барачная больница им. С.П.Боткина (рис.1, рис.2), построенная по проекту арх. Соколова Д.Д., 1880-1881,1909-1910 в структуре города г. Санкт-Петербурга располагается в квартале на пересечении улиц Миргородской, Кременчугской, и Переяславской (согласно генеральному плану старой больницы). Павильоны были отделены друг от друга садиками и цветниками. Комплекс зданий Александровской барачной больницы им. С.П.Боткина представлял собой ансамбль, выдержанный в едином «кирпичном стиле». Планировочное решение павильонов согласно функционально-технологическим решениям и санитарным нормам лечебных учреждений того времени. Объемно-пространственная композиция рассматриваемого лечебного учреждения представлена отдельно стоящими зданиями, связанными в единый архитектурный комплекс. Единство ансамбля обеспечивается выразительностью силуэтов благодаря применению в самых разных сочетаниях высоких двухскатных, четырехскатных, вальмовых, полувальмовых крыш. Объемно-пространственная композиция ассиметрична. Ось разделяет территорию больницы на две зоны: «заразную» и «чистую». Доминантой композиции является часовня св. Александра Невского.

Покровская больница на Васильевском острове архитекторы Штегеман Г.Х., Виндельбандт В.В., Кох К.К. (рис. 3, рис. 4) в «кирпичном стиле» поздней эклектики. В 1858 году в Петербурге на участке Смоленского поля вдоль Большого проспекта Васильевского острова была основана третья в России Община сестер милосердия — Покровская. Основательницей и покровительницей Общины была великая княгиня Александра Петровна, старшая дочь принцессы Терезии и принца Петра Георгиевича Ольденбургских.

Покровская больница (архитекторы Штегеман Г.Х., Виндельбандт В.В., Кох К.К.) была построена 1 ноября 1859 года. Начала свое существование больница в составе Покровской общины. По желанию Государыни Великой княгини Александры Петровны, при больнице было создано «приличное отделение неотложной помощи». В нем находилась аптека, которая была

оснащена материалами необходимыми для отделения. 15 декабря 1860 года больница открыла свои двери для посетителей. Покровская больница была принята «...местными жителями с необычайной благодарностью...» [9]. В 1876 году

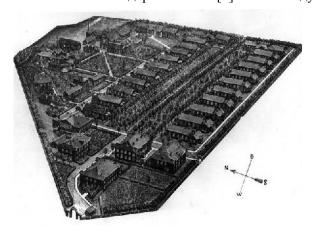


Рис. 1. Схема Александровской барачной больницы им. С.П. Боткина, арх. Соколов Д.Д., 1880–1881, 1909–1910 г. Санкт-Петербург [4].



Рис. 3. Покровская больница, архитекторы Штегеман Г.Х., Виндельбандт В.В., Кох К.К.1859–1899, 1909–1910 [7]

К 1 января 1870 года община, расположенная 3 десятинах 2 191 квадратных саженей земли,, имела следующую структуру построек: трехэтажное каменное здание, в котором помимо больниц размещались отделение для детей от полутора до девяти лет, школа для девочек, трапезная, пекарня и кухня, а на верхнем этаже - Покровская церковь; двухэтажное каменное здание с церковью во имя св. Митрофана Воронежского Чудотворца, грудным отделением и комнатой для главы общины и сестер; двухэтажное каменное здание с хозяйственными службами, такими как баня, прачечная и сушильня. Деревянный одноэтажный флигель с мезонином, в котором размещались приемный покой для амбулаторных больных и аптека; хирургия и кельи сестер; деревянный одноэтажный флигель с мезонином, на первом этаже которого размещалась детская инфекционная больница, а в мезонине - комната

был утвержден «Устав Покровской общины сестер милосердия». За весь период своего существования Покровская больница постепенно расширяла количество мест и состав лечившихся в ней болезней [9].

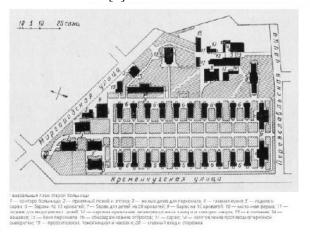


Рис. 2. Генеральный план Александровской барачной больницы им. С.П. Боткина, арх. Соколов Д.Д 1880–1881, 1909–1910, г. Санкт-Петербург [4].

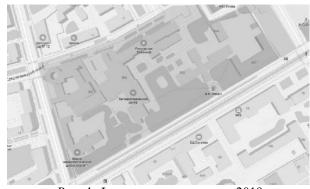


Рис. 4. Фрагмент яндекс карты,2019 г. Санкт-Петербург [8].

для сестер; одноэтажный флигель для вольнонаемной мужской прислуги; бараки для летнего размещения детей [9, с. 1].

Большой участок земли, прилегающий к зданиям, использовался как огород. Официально Покровская община прекратила свое существование в 1918 году, после того как большевики издали указ об отделении Церкви от государства. 22 апреля 1920 года в здании общины открылась Гаванская государственная больница. В настоящее время здание, построенное в 1899 году, является одним из корпусов Санкт-Петербургской Покровской больницы, а помещение церкви скорбящих используется в качестве классной комнаты. Кроме того, сохранилось правое здание общины, в котором размещались амбулатория и ремесленный приют [9].

Планировочное решение павильонов выполнено согласно функционально-технологическим

решениям и санитарным нормам лечебных учреждений. Объемно-пространственная композиция рассматриваемого лечебного учреждения представлена отдельно стоящими зданиями, непосредственно связанными друг с другом переходами, близко расположенными корпусами. Объемно-пространственная композиция ассиметрична. Ось проходит по центральному объему главного трехэтажного здания больницы с домовой церковью. Доминантой композиции является домовая церковь.

В Ростове-на-Дону история городской больницы берет свое начало с 1856 года. Размещалась она в наемных помещениях, это было очень неудобно и влекло за собой постоянное переполнение больными и антисанитарные условия пребывания. Проект постройки собственного здания, составленный в 1857 г., оказался невыполнимым из-за недостатка городских средств [10].

В 1884 г. больницу разместили в ветхих бараках госпиталя «Красного креста», построенных на скорую руку в 1877 г. Только для хирургического отделения был снят частный дом г. Степаненко [11]. В 1877-1878 гг. Российская империя вела войну с Турцией за влияние на северном Причерноморье и на Кавказе. Донская армия принимала активное участие в войне и понесла тяжелые потери. По этой причине в 1877 по просьбе Главного Управления Красного Креста в короткие сроки были построены госпитальные бараки на 150 мест. В восточной части города (между Нахичеванским переулком и проспектом Театральным - «Ростово-Нахичеванской межей») был выделен земельный участок площадью пять тысяч квадратных саженей. окончания войны, В 1877 году госпиталь был закрыт, а его помещения переданы городской администрации для размещения в них городской больницы [10].

История больницы включает в себя несколько исторических этапов. Первый исторический этап городской больницы Ростова-на-Дону берет свое начало в 1884 году, в этот период больничное учреждение размещалось в отремонтированных барачных помещениях бывшего госпиталя, насчитывалось 225 коек. Медицинский персонал составлял минимальное количество человек, а именно четыре врача и восемь человек среднего медицинского персонала. В эти годы Ростов-на-Дону являлся уездным городом Екатеринославской губернии. С 1887 года Ростов был присоединен к Области Войска Донского. Город занимал выгодное географическое положение, находясь на пересечении торговых путей. Быстрое развитие Ростова влекло за собой увеличение численности населения города, прибывающего в поисках работы. В связи с этим увеличилась потребность в больничной помощи. Город нуждался в строительстве больницы и обеспечении горожан медицинскими услугами. Большой вклад в реализацию строительства новой городской больницы на месте бараков внесло купечество. Власти города выделили деньги из местной казны на строительство административного трехэтажного здания больницы. Остальные 12 зданий, в том числе каменную церковь, планировалось построить за счет средств благотворителей. Меценаты нашлись после опубликования в «Ведомостях Ростовской-на-Дону Управы» №1 за 1890 год «Обращение к гражданам…»[10].

Ростовское городское Управление, согласно постановлению Городской Думы, решило с весны 1890 г. приступить к сооружению новых капитальных больничных зданий павильонной системы. Кроме того, предполагалась постройка больничной церкви. Общая смета составила приблизительно 400 тысяч рублей — сумма для городской казны значительная. На помощь пришёл Мартин Федорович Мерошниченко. Он предпринял «... на свои личные средства постройку одного из больших корпусов, стоимостью более 50 тысяч рублей» [12]. На них был возведен первый двухэтажный терапевтический корпус на 148 коек. С 1890 по 1908 гг. его примеру последовали следующие горожане: П.Р. и В.Р. Максимовы, А.Г. Ридель, К.Х. Йонсен, А.А.Берман, Н.К.Бухгейм, К.И.Ермолаев, П.И. и А.П.Ильины, И.С. и Т.С. Леванидовы, Н.А. Панина, Г.И. Ткачев (врач-гинеколог), А.И. Асмолова, К.Д. Дракин, А.Л. Мордовцев, В.Н. Фандеев, Общество взаимного кредита, П.И. Варварова, М.В. Резван, Е.Т. Парамонов, Е.С. Емельянова, Ф.Н. и Е.Н.Солодовы, Ф.М. и М.М. Дутиковы, Л.Э. Конке, П.Ф. и С.А. Севрюговы, Товарищество И.С. Панченко и др. Пожертвования принимались деньгами, строительными материалами, или жертвователи могли своими «личными распоряжениями» строить отдельные здания. Дума учредила Комитет под председательством городского Головы Ивана Степановича Леванидова [12].

Архитектор Соколов Николай Матвеевич разработал проект больничного комплекса, включая каменную церковь (рис.5, рис.6). «Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы» от 1896 года сообщалось, что «... во дворе Ростовской городской больницы построены по проекту архитектора Н.М. Соколова паровая прачечная, амбулатория, часовня. Здание амбулатории окончательно отделано в 1896 году» [18, с.1]. Проект включал в себя 13 зданий павильонного типа: одно-, два- двухэтажных и десять – одноэтажных. Впоследствии проект был изменен по пожеланию меценатов, спонсирующих строительство,

здания стали носить имена меценатов-дарителей [18].

Закладка городской больницы Красного Креста на 300 мест произошла 18 апреля 1891 года. В октябре 1891 года были освящены два построенных павильона. По просьбе горожан, больница получила приставку «Николаевская», в честь спасения от покушения на наследника императорского престола (в японском городе Оцу, 1891г.). Данное название закрепилось официально. Данные события ознаменовали второй этап истории больницы. В январе 1896 г. Ростовской-на-Дону городской больнице было присвоено имя «Николаевская» [17].

Во дворе городской больницы устроили дощатую открытую эстраду, один конец которой занимала палатка, в которой епископом Екатеринославским и Таганрогским Серапионом вместе с местным духовенством «совершено было молебствие» в присутствии окружных и областных властей, Городского Головы И. С. Леванидова, практикующих в городе врачей и приглашённых горожан. Первые камни заложил Войсковой Наказной Атаман (в корпус, сооружаемый на средства М. Ф. Мерошниченко), Преосвященный Серапион и И. С. Леванидов (в административный корпус, сооружаемый на городские средства).

После закладки зданий Городской Голова послал приветственную телеграмму, находящемуся в Варшаве М. Ф. Мерошниченко [13]. Газета «Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы» писала, что «прилив пожертвований идёт далеко впереди технической возможности самой скорой постройки» [14]. Строительство было действительно «скорым», так как уже в октябре 1891 г. были «окончены постройкою и приспособлены для помещения больных один двухэтажный павильон на 100 кроватей и три одноэтажных на 25 больных каждый» [15]. В эти здания и переводились больные из деревянных бараков, предназначенных к сносу. К 1892 г. построили уже 11 павильонов [11, с. 2].

В 1892 году больница перешла во вновь отстроенные три двухэтажных корпуса и восемь одноэтажных и имела 450 коек. Для больничных зданий было выделено 10 десятин земли. Она была обеспечена необходимыми средствами, оборудованием и служебными помещениями для нормального функционирования. В 1893 году на средства А.Л. Мордовцева начали строить двухэтажное здание амбулатории, одноэтажный корпус, паровую прачечную, а затем новый анатомический театр. В 1894 году на средства купца Платона Михайловича Троянкина была построена церковь во имя Архангела Михаила, известная

как церковь Красного Креста [15]. В 1895 г. с разрешения врачебного Совета при больнице была открыта первая лаборатория по производству противодифтерийной сыворотки, долгое время являющаяся единственной в России. В связи с завещанием покойного купца П.Р. Максимова, архитектор Н.М. Соколов несколько «отвлекается для строительства Дома Трудолюбия имени П.Р. Максимова на углу Нахичеванского переулка и Мало-Садовой улицы. В 1897г. было построено двухэтажное здание Дома Трудолюбия - ныне двухэтажный административный корпус ГДМУ. Рядом была возведена и Свято-Владимирская церковь (сохранилась часть цоколя). Дом Трудолюбия оказывал помощь неимущим и бездомным гражданам, предоставлением им платного труда, обедов и ночлега. В 1899 году на должность главного врача больницы приходит Николай Васильевич Парийский – приват-доцент Императорской Военно-медицинской Академии (1858–1923). Позже в Донском университете, на медицинском факультете он стал профессором ортопедии и редактором журнала «Медицинская жизнь» [18].

Архитектор Н.М. Соколов при разработке проекта больницы предусмотрел на её территории строительство больничной церкви. Торжественная церемония закладки храма состоялась 18 мая 1890 года. Закладной камень освятил епископ Екатеринославский и Таганрогский Серапион. Строительство храма велось с 1890 по 1894 гг. Храм освятили во имя Архангела Михаила избавителя от злых духов, которые в христианстве считались источником болезней. Храм был построен в неовизантийском стиле, в его оформлении присутствовали элементы древнерусского зодчества [10].

В конце XIX века городская больница г. Ростова-на-Дону была сравнима с такими же столичными учреждениями и являлась одной из лучших на юге России. В 1900 году верхний этаж здания амбулатории был приспособлен для размещения вновь открывшейся при больнице «Общины сестер милосердия Красного Креста во имя Святителя Николая Чудотворца» на 12 сестер. В этом же году была заново перестроена больничная аптека, для которой расширили помещение, а палаты для больных при амбулатории были упразднены. К началу XX в. больница имела анатомический театр, амбулаторию, прачечную, приют для душевнобольных, пастеровскую станцию. Павильоны носили имена граждан-жертвователей: М.Ф. Мерошниченко, А.Л. Мордовцева, Е.Т. Парамонова, Л.Э. Конке, И.С. и Т.С. Леванидовых, В. Р. Максимова, П.Ф. и С.А. Севрюгиных, П.И. Ильина, Е.С. Емельянова и др. [10, с. 3, 4].

В 1903 году Н.М. Соколовым был построен приют для душевнобольных на средства Е.Т. Парамонова (ныне кафедра психиатрии и больничный корпус ДГМУ). На средства Л.Э. Конке в 1904 году открылась Пастеровская станция. В том же году на средства Е.С. Емельяновой был построен павильон для лечения детских заразных болезней. В 1905 году заново перестроен анатомический покой. В 1908 году построено здание имени П.Ф. и С.А. Севрюговых, в котором на верхнем этаже разместился родильный приют, а на нижнем - хирургическое отделение - ныне корпус факультета хирургии. В этом же году при больнице была открыта акушерско-фельдшерская школа с 4-летним курсом. В 1912 году состоялся ее первый выпуск. В 1909 году лаборатория для добывания противодифтеритной сыворотки и Пастеровская станция преобразовались в Бактериологический институт. В 1910 году Николаевская больница представляла большой комплекс больничных зданий, большинство из которых было построено на частные пожертвования и получило соответственно имя своих благотворителей. Как указано в «Журнале Ростовской городской думы за 1908 год» Городской управой было поручено Комиссии в сотсаве: главного врача больницы Н.В. Парийского, городских архитекторов В.А. Брандта и П.Я. Любимова, городского инженера Д.А. Самсонова выработать задание на устройство центрального отопления в большинстве построенных зданий при этом указывался список всех выстроенных корпусов и павильонов больничного комплекса [18].

Постепенно сформировался архитектурный ансамбль. Павильоны отделили друг от друга садиками и цветами, а всю больницу от Большой Садовой — хорошим парком в 2 десятины [11, с. 5]. В «Отчёте Ростовской городской Николаевской больницы за 1900 г.», составленном под редакцией главного врача доктора медицины Н. В. Парийского, написано, что Ростовская больница считается одной из лучших на юге России [11].

В 1908 году в списке зданий больницы имелось 24 наименования различных медицинских подразделений. Помимо Архангело-Михайловской церкви, построенной на средства П.М. Троянкина, были названы корпуса: «Двухэтажный корпус М.Ф. Мерошниченко для терапевтических больных на 148 коек; одноэтажный павильон Общества Взаимного Кредита для льготных больных на 12 мест; одноэтажный павильон В. Р. Максимова для туберкулезных больных мужского пола на 24 койки; одноэтажный павильон В.Р. Максимова для сифилитических больных мужского пола на 24 койки; одноэтажный павильон И.С. и Т.С. Леванидовых для венерических

больных мужского пола на 24 койки; одноэтажный павильон Бермана, Бехгейма, Ионсена и Риделя для больных брюшным тифом мужского пола на 24 койки; одноэтажный павильон П. И. Ильина для инфекционных больных на 36 коек: одноэтажный павильон К. И. Ермолаева для сифилитических и венерических больных женского пола на 24 койки; одноэтажный павильон А. А. Мордовцева для общих детских болезней на 24 койки; одноэтажный павильон Г. И. Ткачева для гинекологических больных на 18 коек; двухэтажный хирургический корпус имени Асмолова, Дракина, Варварова, Паниной и др. на 108 коек; двухэтажный павильон Е.С. Емельяновой для детских инфекционных болезней на 64 койки; одноэтажный павильон Е.Т. Парамонова для нервных и психических больных на 24 койки; двухэтажное здание диспансера, в котором размещались приемные покои для поступающих пациентов, аптека и приемный покой. На верхнем этаже находилась община сестер милосердия Красного Креста; хирургический корпус; павильон им. Севрюгова; павильон для священнослужителей; павильон им. Емельяновых; двухэтажное здание паровой прачечной с сушильной комнатой; анатомический покой с патологоанатомическим кабинетом и музеем; двухэтажное каменное здание казармы для служителей; пастеровская станция имени Л.Е. Конке; теплица и квартира садовника; каменная кладовая; мусоросжигательная печь» [18, c.1].

Всего для больницы было построено около 30 зданий. В клинических корпусах разместились, помимо перечисленных выше, отделения для больных различного профиля: для общих детских и инфекционных заболеваний, венерических, тифозных, инфекционных взрослых, гинекологических, нервных («душевных») больных и пр. Отдельно в больничном дворе стояли: конюшни и помещения для кроликов и морских свинок. Павильоны были отделены друг от друга садиками и цветниками. От улицы Большой Садовой больничный комплекс отделяла прекрасная парковая зона площадью около 2 десятин. В больнице размещалось 800 человек. Первоначальный план Городской «Николаевской» больницы сохранился в фондах Государственного Архива Ростовской области [18].

В 1915 году начался следующий исторический этап Николаевской больницы г. Ростова-на-Дону. Данный период ознаменован тем, что в здании Николаевской городской больницы расположился Императорский Варшавский Университет, затем городской женский медицинский институт, а впоследствии Донской университет в лице его медицинского факультета, объединенного с ме-

дицинским институтом. В июне 1922 года в г. Ростове-на-Дону была открыта Донская окружная больница (будущее название ЦГБ г. Ростова-на-Дону). В сентябре этого же 1922 года на территорию бывшего госпиталя перебралась основная часть отделений Николаевской городской больницы. В освободившиеся помещения Николаевской больницы продолжали перемещаться разбросанные по городу кафедры медицинского факультета переехавшего в Ростов-на-Дону Варшавского университета. При этом, часть кафедр (глазные болезни, ЛОР-болезни, госпитальная терапия, инфекционных болезней и др.) разместились на территории Донской окружной больницы. В 1930 году в Ростове был образован Медицинский институт и ему были переданы все

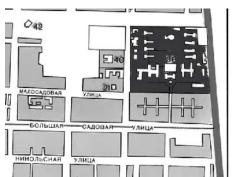


Рис. 5. Фрагмент карты Ростова-на-Дону 1912–1914 [19]

В 1889 году городская Дума приняла решение о строительстве новой больницы по проекту инженера Соколова (рис. 7, рис. 8). Строительство возглавил купец Сыроватский. К началу 1898 года на окраине города было построено два больничных здания. Лечение в больнице было платное, но имелось пять бесплатных коек имени Семенкиной, которые она завещала содержать на 5 тысяч рублей в год. На весь город в то время было всего два врача: заведующий лечебницей Фабиан Натанович Гурари и, возможно, Кравцов Александр Александрович - его фамилия с указанием должности уездного земского врача встречается в метрической книге Александро-Невской церкви [21] На строительство двух кирпичных зданий больницы и дом врача было израсходовано 40 тысяч рублей. В 1901 г. известная благотворительница Л.В. Тиммерман предложила городским властям разместить в ее доме и усадьбе больницу, богадельню и лечебницу. Все эти здания на тот момент имелись в Азове, но не отличались хорошими условиями.

В 1908 г, как сообщал голова, «вследствие тесноты в подаренной усадьбе и необходимости расширения больницы». Больницу из подаренной Тиммерман усадьбы власти намеревались перевести в имевшиеся у города больничные корпуса постройки 1894 года. Был странным тот

здания бывшей Николаевской больницы. В результате больничная база бывшей Николаевской больницы г. Ростова-на-Дону была передана под клинику Ростовского медицинского института и больница, как юридическое лицо, прекратила своё существование [10]

Вопрос о здравоохранении в Азове в конце XVIII – начале XX вв. являлся весьма проблематичным аспектом в жизни города. В конце XVIII в Азове находился один полковой лекарь Фалкенштейн и два подлекаря — они обслуживали военное и гражданское население и каторожных. В конце XIX века в Азове имелась небольшая городская больница на 20 коек с амбулаторными приемом и одна частная аптека. На весь город было два врача.



Рис. 6. Схема Николаевской городской больницы, 1890 арх. Н.М. Соколов, г. Ростов-на-Дону [20]

факт, что больницу в 1903 г. разместили в бывшем жилом доме, а не в сооруженных ранее специально для нее зданиях. Обстоятельства были таковы, что в 1894—1896 гг. город вел переписку по поводу строившейся больницы с подрядчиком купцом Сыроватским.

Дума по каким-то причинам объект не принимала. Корпуса больницы так и остались недостроенными и ветшали без применения. А после 1911 г. город решил обустроить эти здания. В 1911–1912 гг. строительные работы в больничных корпусах и доме врача были завершены. Больницу сдали в эксплуатацию. В 1912 г. на территории больничного комплекса, который состоял в то время из двух больничных корпусов, домика для врача, заразного отделения и морга, была заложена небольшая часовня. Инициатором постройки был азовчанин Михаил Головской.

«Ансамбль зданий городской больницы» является объектом культурного наследия и включает в себя: 1-е здание больничного корпуса, 2-е здание больничного корпуса, дом врача, часовню. Ансамбль расположен в центральной исторической части города Азова. Ансамбль, кроме часовни запроектирован городским архитектором Николаем Матвеевичем Соколовым.



Рис.7. Ансамбль зданий городской больницы, 1889, арх. Н.М. Соколов, г. Азов [21]

1-е здание больничного корпуса, расположенного по адресу: г. Азов, ул. Измайлова, 58, литер Б.1-й больничный корпус (ныне здание кардиологического отделения) входит самбль застройки Азовской городской больницы, его закладка состоялась в 1894 году. Здание представляет собой сложную конфигурацию в плане, кирпичное, двухэтажное с многоскатной крышей. Несущие стены здания выполнены из полнотелого керамического кирпича на сложном цементно-песчаном растворе. Фасады здания решены в т.н. «кирпичном стиле» без штукатурной отделки наружных стен. Планировка здания коридорного типа с одно и двухсторонним расположением больничных палат и врачебных кабинетов. Сообщение между этажами осуществляется по внутренней 2-х маршевой лестнице.

2-е здание больничного корпуса, расположенного по адресу: г. Азов, ул. Измайлова, 58, литер Б. 2-й больничный корпус (ныне противотуберкулезный клинический диспансер) является составной частью ансамбля застройки Азовской городской больницы. Здание сложной Н-образной конфигурации в плане, кирпичное, переменной этажности (высотой от одного до двух этажей) с подвалом и многоскатной крышей. Характерными элементами его объемно-пространственной композиции являются 2-х этажный

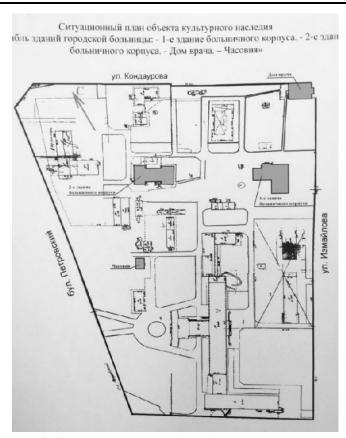


Рис. 8. Ситуационный план Ансамбля зданий городской больницы, 1889, арх. Н.М. Соколов, г. Азов [21].

объем центральной части и два боковых, симметрично расположенных ризалита. Стены здания выполнены из полнотелого керамического кирпича старого образца. В кладку стен цоколя включены блоки мелкозернистого известняка-ракушечника, кирпич и бутовый камень. Фасады здания решены в т.н. «кирпичном стиле» без штукатурной отделки наружных стен. Планировка здания коридорного типа с одно и двухсторонним расположением больничных палат и врачебных кабинетов. Вход в здание осуществляется через наружные двери северо-западного и югозападного фасадов.

«Дом врача», расположенный по адресу: г. Азов, ул. Кондаурова, 6, литер А.

Дом врача (ныне кожно-венерологический диспансер) располагается на территории современного больничного комплекса на пересечении улиц Измайлова и Кондаурова. Здание сложной конфигурации в плане, кирпичное, одноэтажное с подвалом и многоскатной крышей. Стены здания выполнены из полнотелого керамического кирпича старого образца. Фасады здания решены в т.н. «кирпичном стиле» без штукатурной отделки наружных стен. Вход в здание организован через портал парадного входа со стороны ул. Измайлова и через дверь служебного входа западного фасада. В основу планировки здания легла

коридорная схема расположения помещений [22].

После рассмотрения двух больниц – Николаевской городской больницы в г. Ростове-на-Дону и Центральной городской больницы в г. Азове можно провести сравнительный анализ:

1. Николаевская больница в структуре города располагается в квартале на пересечении улиц Пушкинской, Большой Садовой, переулка Нахичеванского и Нахичеванской межи (согласно Плану города Ростова-на-Дону 1917 года). Павильоны были отделены друг от друга садиками и цветниками. От улицы Большой Садовой больничный комплекс отделяла прекрасная парковая зона площадью около 2 десятин.

Комплекс зданий Николаевской городской больницы - значительный ансамбль данного периода, построенный в едином стиле. Эта сложная задача была решена, не смотря на количество и масштабность построек. Гармоничное сочетание зданий ансамбля в едином ключе, не допуская «однообразия» решений, и в то же время «разнообразием», не утрачивая цельность комплекса. Задача была достаточно непростой, так как к большинству зданий был не применим разнообразный декор фасадных решений по причине функционального назначения. Стилевой доминантой, объединяющей весь ансамбль, выступает в данном случае эклектика. Планировочное решение павильонов согласно функционально-технологическим решениям и санитарным нормам лечебных учреждений того времени. Ансамбль Николаевской больницы был выполнен архитектором Н.М. Соколовым в «кирпичном стиле».

«Кирпичный стиль» в последней трети XIX века получает большое распространение в рациональной архитектуре России. В архитектуре фасадов используется простой и практичный метод отделки. Поверхность кладки стен стали обнажать или облицовывали высококачественным кирпичом или керамической плиткой. Использование полихромного кирпича, израцов, терракотовых вставок, природного камня обогащало художественные возможности архитектуры. Рациональность форм, их связь со свойствами материалов определяли характер зданий кирпичного стиля. Выразительность построек достигалась за счет использования рельефной кладки, рисунок которой выделялся пластикой и цветом [23].

Объемно-пространственная композиция рассматриваемого лечебного учреждения представлена отдельно стоящими зданиями, связанными в единый архитектурный комплекс. На фасадах контрастно сопоставляются облицовочный кирпич и оштукатуренная поверхность. Единство ансамбля обеспечивается в немалой степени и

выразительностью силуэтов благодаря применению в самых разных сочетаниях высоких двухскатных, четырехскатных, вальмовых, полувальмовых крыш, а также «палаток», «колпаков» и шатров. Построение композиции внешних объемов Николаевской больницы - это особый вид сложных объемных композиций представляют композиции комплексов зданий, в такой композиции компонентами выступают сами здания. объемно-пространственной Выразительность композиции достигается с помощью ряда композиционных средств - симметрии и асимметрии, ритма, пропорций, масштаба. Композиция ансамбля Николаевской больницы симметричная, композиционная ось симметрии проходит через главный корпус - трехэтажное здание больницы и Архангело-Михайловскую церковь, тем самым выделяя главное здание и подчиняя ему окружающее пространство. Симметричные композиции имеют большое значение в ансамблевой застройке. Не маловажным композиционным средством в данном ансамбле является масштабность. Масштабность используется архитектором для подчеркивания большей или меньшей величины сооружения в зависимости от его архитектурной значимости. Доминантой и центром композиции является трехэтажное здание - административный корпус больницы, располагающийся на центральной оси композиции.

2. Ансамбль зданий городской больницы является объектом культурного наследия и включает в себя: 1-е здание больничного корпуса, 2-е здание больничного корпуса, дом врача, часовню. Ансамбль, кроме часовни запроектирован городским архитектором Николаем Матвеевичем Соколовым. К началу 1898 года постройки располагались на окраине города. На данный момент ансамбль расположен в центральной исторической части города Азова между улицами Кондаурова, Измайлова и Петровским бульваром.

Комплекс зданий Азовской городской больницы представлял собой весьма небольшой ансамбль, выдержанный в едином ключе. Стилевой доминантой, объединяющей весь ансамбль, выступает в данном случае эклектика. Планировочное решение павильонов согласно функционально-технологическим решениям и санитарным нормам лечебных учреждений того времени. Планировки зданий выполнены коридорного типа с одно и двухсторонним расположением больничных палат и врачебных кабинетов. Фасады зданий ансамбля Азовской городской больницы были решены архитектором Н.М. Соколовым в «кирпичном стиле» без штукатурной от-

делки наружных стен. Несущие стены здания выполнены из полнотелого керамического кирпича на сложном цементно-песчаном растворе.

Объемно-пространственная композиция рассматриваемого лечебного учреждения представлена отдельно стоящими зданиями, связанными в единый архитектурный комплекс. Композиция ансамбля Азовской городской больницы асимметричная, композиционная ось проходит между первым и вторым зданиями больничных корпусов. Выраженной доминанты и центра композиции как таковых нет. Здания корпусов довольно простой конфигурации в объемах.

- 3.Обе больницы построены по принципу павильонной застройки.
- 4.Территория больниц делилась на зоны с больничными корпусами в зависимости от заболеваний. В Азове представлена маленькая больница, характерная для периферийного города, поэтому здесь всего несколько корпусов, Николаевская больница представляла большой комплекс больничных зданий, насчитывавший 30 зданий.
- 5.На территории каждой больницы обязательно располагалась больничная церковь или часовня (хотя в г. Азове она была построена уже после смерти архитектора Н.М. Соколова)
- 6. Фасады обеих больниц были выполнены в кирпичном стиле, характерном для творчества Николая Матвеевича Соколова представителя рационального направления в архитектуре.
- 7. Каждая из больниц представляет собой сформированный архитектурный ансамбль, в котором павильоны представлена отдельно стоящими зданиями, связанными в единый архитектурный комплекс.
- 8. Автор предполагает, что Николаевская городская больница явилась аналогом для строительства Центральной городской больницы в г. Азове. В свою очередь на проектирование самой Николаевской больницы оказала влияние столичная больница по проекту Д.Д. Соколова.

На основании вышеизложенного материала можно выявить общие черты между рассматриваемыми больницами Санкт-Петербурга и больницами, построенными по проекту Николая Матвеевича Соколова:

- а) больницы представлены павильонной застройкой;
- b) На территории каждой больницы имеется церковь или часовня;
- с) Принцип расположения корпусов в зависимости от функционально-технической принадлежности
 - d) Деление территории на зоны:

е) Фасады выполнены в «кирпичном стиле», стилевой доминантой, объединяющей весь ансамбль, выступает в данном случае эклектика.

Выводы. В результате исследования лечебных учреждений: Николаевской городской больницы г. Ростова-на-Дону и комплекса городской больницы в г. Азове, построенных по проекту городского архитектора конца XIX- начала XX века Николая Матвеевича Соколова, были выявлены характерные особенности и проведен сравнительный анализ. В ходе которого, были найдены и выявлены схожие черты архитектурно-художественных и градостроительных решений. На основании этого можно сделать вывод, что Николаевская городская больница явилась аналогом для строительства Центральной городской больницы в г. Азове. В свою очередь на проектирование самой Николаевской больницы оказала влияние столичная Александровская городская барачная больница в память С.П.Боткина г. Санкт-Петербурга по проекту Д.Д. Соколова.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке $P\Phi\Phi U$ в рамках научного проекта № 19-31-27001. Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-31-27001

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Барановский Г.В. Юбилейный сборник сведений о деятельности бывших воспитанников Института гражданских инженеров (Строительного училища) 1842–1892г., г. Санкт-Петербург, 1893 г. С. 148–152.
 - 2. Зодчий. 1873. № 3-4. С. 37-40
- 3. Петрусенко Ю.В. Влияние «зодчихнаставников» на творчество архитектора Николая Матвеевича Соколова // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2019. С. 73–80.
- 4. Раевский К. Статья «Городская санэдидемстанция». Журнал «Адреса Петербурга» 2009. №35/49. С. 20–21.
- 5.Ред.коллегия: Белова Л.Н.Булдаков Г.Н. и др. Санкт-Петербург. Петроград.Ленинград: Энциклопедический справочник. Москва, Научное издательство «Большая Российская Энциклопедия», 1992. С. 697.
- 6. Антонов В.В., Кобак А.В. Святыни Петербурга, Ист.церков. энциклопедия: В 3т. Спб, «Лики России», 1996. С. 512.
- 7. Покровская больница. Фото. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.citywalls.ru/house145.html?s=t22s2kcbl v924adee23ln42n05 (дата обращения 11.11.2019)

- 8.Фрагмент яндекс карты 2019г. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg (дата обращения 11.11.2019)
- 9.Покровская больница. История. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.citywalls.ru/house145.html?s=t22s2kcbl v924adee23ln42n05 (дата обращения 11.11.2019)
- 10.Филонов Л.Г., Маслов А.И., Сикилинда В.Д., Алабут А.А.. Страницы летописи Николаевской больницы Красного креста г. Ростов-на-Дону. С.48-51.
- 11. Парийский Н. В. Краткое описание Ростовской-на-Дону городской «Николаевской» больницы. г. Ростов н/Д. 1910. С. 1, 2.
- 12.Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы. 1890. 7 янв.
- 13. Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы. 1890. 22 апр.
- 14. Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы. 1891. 20 апр.
- 15. Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы. 1891. 3 нояб.
- 16. Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы. 3 нояб.
- 17. Ведомости Ростовской-на-Дону городской управы. 1896. 18 авг.
- 18.Город Ростов-На-Дону. Хирургический Корпус Николаевской Городской Больницы.

- [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://www.liveinternet.ru/community/2411445/post74355940/ (дата обращения 30. 08.2019).
- 19.Фрагмент карты г.Ростова-на-Дону 1912-14 гг., фото. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. http://www.etomesto.ru/map/base/61/rnd1914.jpg. (дата обращения 20.09.2019).
- 20. Николаевская городская больница, г.Ростов-на-Дону, фото. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Nikolayevskaya_hospital_Rostov-on-Don.jpg (дата обращения 20.09.2019).
- 21.Центральная городская больница г.Азова. Историческая справка. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://www.azovcgb.ru/about/info/history/ (дата обращения 20.07.2019).
- 22. Охранное обязательство № 66-16 на объект культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации: «Ансамбль зданий городской больницы: -1-е здание больничного корпуса, -2-е здание больничного корпуса. Дом врача. Часовня», от 01.07.2016 г.
- 23. Николаева Т.И. Виктор Шретер. Иероним Китнер. Санкт-Петербург: Изд.дом «Коло», 2007. 400 с.

Информация об авторах

Петрусенко Юлия Викторовна, аспирант кафедры Истории Архитектуры Искусств и Архитектурной Реставрации, ассистент кафедры Основ Архитектурно-Художественного Проектирования. E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru. Южный Федеральный Университет. Академия архитектуры и искусств. Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42.

Поступила в ноябре 2019 г. © Петрусенко Ю.В, 2020

PetrusenkoY.V.

Southern Federal University. Academy of Architecture and Arts E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru

MEDICAL INSTITUTIONS IN THE WORK OF ARCHITECT NIKOLAI MATVEEVICH SOKOLOV. COMPARATIVE ANALYSIS

Abstract. The article considers the Nikolaev city hospital in Rostov-on-don and a complex of city hospital in Azov constructed under the project of the city architect of the end of XIX - the beginning of XX century Nikolai Matveevich Sokolov. Sokolov is a representative of the rational direction of architecture of the XIX century. The article solves the problem of determining in these works the general trends inherent in the architecture of the turn of the XIX-XX centuries, as well as the features of the N. M. Sokolov work. Search and identification of analogs of medical institutions which architecture influenced external and internal shape of the considered objects is made. The basic conditions of design, value of objects in historical building are also defined. The purpose of the study is to identify the features of the creative method of the master on the example of the design of medical institutions. The article reveals the unknown facts of the creative activity of Nikolai Matveevich Sokolov, introduces new factual data, systematizes information about the creative heritage of the architect. A comparative analysis of the studied objects and known examples of hospital architecture of the

late XIX - early XX centuries are performed, similarities and features of the works of N. M. Sokolov are identified.

Keywords: architecture of the late XIX-early XX century, the creative method of the architect, hospitals, Nm Sokolov, Nikolaev city hospital, Rostov-on-don, the city hospital complex, Azov.

REFERENCES

- 1. Baranovskiy G.V. Commemorative collection of information about the activities of former pupils of the Institute of civil engineers (Building schools) 1842–1892. [Yubilejnyj sbornik svedenij o deyatel'nosti byvshih vospitannikov Instituta grazhdanskih inzhenerov (Stroitel'nogo uchilishcha) 1842–1892g]. Saint-Petersburg, 1893. Pp. 148–152. (rus)
- 2. Architect. 1873 [Zodchij. 1873]. No. 3–4. Pp. 37–40. (rus)
- 3. Petrusenko Yu.V. Influence of «architectsmentors» on creativity of the architect Nikolai Matveevich Sokolov [Vliyanie «zodchih-nastavnikov» na tvorchestvo arhitektora Nikolaya Matveevicha Sokolova]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Pp.73–80. (rus)
- 4. Rajewski K. The article «Urban sanepidem-stantsiya». Journal «Addresses of St. Petersburg» [Stat'ya «Gorodskaya sanedidemstanciya». Zhurnal «Adresa Peterburga»]. 2009. No. 35/49 Pp. 20–21. (rus)
- 5. Editorial Board: Belova L.N. Buldakov G.N. et al. St. Petersburg. Petrograd. Leningrad: Entsiklopedicheskii Spravochnik. [Petrograd.Leningrad: Enciklopedicheskij spravochnik]. Moscow, Scientific publishing house «Big Russian encyclopedia», 1992. 697 p. (rus)
- 6. Antonov V.V., Kobak A.V. Shrines Of St. Petersburg, Ist.Church.encyclopedia: in 3T. [Svyatyni Peterburga, Ist.cerkov.enciklopediya: V 3t.]. SPb, «Faces of Russia», 1996. 512 p. (rus)
- 7.Pokrovsky hospital. Photo. [Pokrovskaya bol'nica. Foto] Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.citywalls.ru/house145.html?s=t22s2kcblv924adee23ln4 2n05 (accessed 11.11.2019). (rus)
- 8. Fragment Yandex maps 2019. [Fragment yandeks karty 2019g.] Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg (accessed 11.11.2019). (rus)
- 9. Pokrovsky hospital. History. [Pokrovskaya bol'nica. Istoriya.] Systems'. requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.city-walls.ru/house145.html?s=t22s2kcblv924adee23ln4 2n05 (accessed 11.11.2019) (rus)
- 10. Filonov L.G., Maslov A.I., Sikilinda V.D., Alabut A.A.. Pages of the chronicle of the Nikolaev hospital of the red cross of Rostov-on-don. [Stranicy letopisi Nikolaevskoj bol'nicy Krasnogo kresta g. Rostov-na-Donu.]. Pp. 48–51. (rus)

- 11. Pariysky N.V. Brief description of Rostovon-don city «Nikolaev» hospital [Kratkoe opisanie Rostovskoj-na-Donu gorodskoj «Nikolaevskoj» bol'nicy]. Rostov n / D., 1910. P. 1, 2. (rus)
- 12. Vedomosti Rostov-on-don city Council. [Vedomosti Rostovskoj-na-Donu gorodskoj upravy]. 1890. 7 Jan. (rus)
- 13. Vedomosti Rostov-on-don city Council. [Vedomosti Rostovskoj-na-Donu gorodskoj upravy]. 1890. 22 Apr. (rus)
- 14. Vedomosti Rostov-on-don city Council. [Vedomosti Rostovskoj-na-Donu gorodskoj upravy]. 1891. 20 Apr. (rus)
- 15. Vedomosti Rostov-on-don city Council. [Vedomosti Rostovskoj-na-Donu gorodskoj upravy]. 1891. 3 Nov. (rus)
- 16. Vedomosti Rostov-on-don city Council. [Vedomosti Rostovskoj-na-Donu gorodskoj upravy]. 1896. 3 Nov. (rus)
- 17. Vedomosti Rostov-on-don city Council. [Vedomosti Rostovskoj-na-Donu gorodskoj upravy]. 1896. Aug 18. (rus)
- 18. City Of Rostov-On-Don. Surgical Building Of The Nikolaev City Hospital. [Gorod Rostov-Na-Donu. Hirurgicheskij Korpus Nikolaevskoj Gorodskoj Bol'nicy]. Systems'. requirements: AdobeAcrobatReader. URL: https://www.liveinternet.ru/community/2411445/post74355940/ (accessed 30. 08.2019) (rus)
- 19. Fragment of the map of Rostov-on-don 1912-14gg., photo. [Fragment karty g.Rostova-na-Donu 1912-14gg., foto]. Systems'. requirements: AdobeAcrobatReader.
- http://www.etomesto.ru/map/base/61/rnd1914.jpg. (accessed 20.09.2019) (rus)
- 20. Nikolaev city hospital, Rostov-on-don, photo [Nikolaevskaya gorodskaya bol'nica, g.Rostov-na-Donu, foto.] Systems'. requirements: AdobeAcrobatReader. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Nikolayevskaya_hospital._Rostov-on-Don.jpg (accessed 20.09.2019) (rus)
- 21. Central city hospital of Azov. Historical information [Central'naya gorodskaya bol'nica g.Azova. Istoricheskaya spravka]. Systems'. requirements: AdobeAcrobatReader. URL: https://www.azovcgb.ru/about/info/history/ (accessed 20.07.2019) (rus)
- 22. The security obligation No. 66-16 on object of cultural heritage (historical and cultural monuments) of the people of the Russian Federation: «Ensemble of buildings of city hospital: -the 1st building of the hospital case,-the 2nd building of the hospital case. Doctor's house. Chapel», from 01.07.2016 g.

[Ohrannoe obyazatel'stvo № 66-16 na ob"ekt kul'turnogo naslediya (pamyatnikov istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj Federacii: «Ansambl' zdanij gorodskoj bol'nicy: -1-e zdanie bol'nichnogo korpusa, -

2-e zdanie bol'nichnogo korpusa. Dom vracha. CHasovnya», ot 01.07.2016g.] (rus)

23.Nikolaeva T.I. Victor Schroeter. Jerome Kitner [Viktor Shreter. Ieronim Kitner]. St. Petersburg: Ed.Colo house, 2007. 400 p.

Information about the authors

Petrusenko, Yulia V. Post-graduate student. E-mail: miss.smiyukha21@yandex.ru. Southern Federal University. Academy of architecture and arts. Russia, 344006, Rostov-on-don, Bolshaya Sadovaya street, 105/42.

Received in November 2019

Для цитирования:

Петрусенко Ю.В Лечебные учреждения в творчестве архитектора Николая Матвеевича Соколова. Сравнительный анализ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 72–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-72-84

For citation:

Petrusenko Y.V. Medical institutions in the work of architect Nikolai Matveevich Sokolov. Comparative analysis. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 72–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-72-84

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-85-95

*Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В.

Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского *E-mail: viktoria802@gmail.com

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ

Аннотация. Исследовано влияние термоэластопластов, представляющих собой двухблочные статистические блок-сополимеры на основе полибутилентерефталата и политетраметиленоксида с различным соотношением жестких и эластичных блоков, на статические и динамические механические свойства эпоксидных полимеров. Исходными соединениями для синтеза блок-сополимеров являлись диметилтерефталат, 1,4-бутандиол и политетраметиленоксид с молекулярной массой 2000. В качестве катализатора реакции использовали тетрабутоксититан. Процесс взаимодействия исходных компонентов осуществляли в две стадии, последовательно проводя реакцию переэтерификаиии и сополиконденсации. Состав БСП задавали соотношением исходных реагентов. Общая молекулярная масса блок-сополимеров составляла 30-40 тысяч. Методом динамического механического анализа показано, что введение модификаторов приводит к уменьшению молекулярной подвижности в широком температурном диапазоне от низкотемпературного (при 220К) до высокотемпературного (при 380К) релаксационных переходов. Величина эффекта зависит от соотношения жесткого и гибкого блоков в блок-сополимере. Предположено, что уменьшение тангенса угла механических потерь при температурах ниже температуры стеклования и особенно в области β-перехода, может быть связана с замедлением релаксационных процессов на границе раздела эпокидной матрицы с жесткими блоками термоэластопласта. Наблюдаемые эффекты в области высокотемпературного перехода могут быть связаны с ограничением свободы конформационных перегруппировок вблизи поверхностей раздела эпоксидного полимера с блоками полибутилентерефталата и политетраметиленоксида и увеличением плотности поперечного сшивания эпоксида. Установлено заметное снижение величины и скорости ползучести эпоксидных композитов при введении в них термоэластопласта.

Ключевые слова: эпоксидный полимер, термоэластопласт, блок-сополимер полибутилентерефталат-политетраметиленоксид, релаксационные переходы, ползучесть

Введение. До настоящего времени не теряет актуальности поиск модификаторов, способствующих эффективному повышению ударопрочости эпоксидных композитов при сохранении их теплостойксти и жесткости. В этом плане большой интерес представляют термопластичные каучуки, так называемые термоэластопласты (ТЭП) [1-6]. ТЭП представляют собой блок-сополимеры строения (ABA) и (AB)_n, где A – жесткие блоки термопластов, В - гибкие эластомерные блоки, отличающиеся тем, что ниже температуры стеклования жесткого компонента эти материалы обладают очень хорошей прочностью и эластичностью, а при более высоких температурах - текучестью, свойственной линейным полимерам. При отсутствии обычных химических сшивок это явление можно понять, рассматривая домены жесткой фазы как полифункциональные узлы пространственной сетки. Двухблочные сополимеры не способны образовывать физическую сетку, поскольку только один конец эластичного блока химически связан с жестким доменом. Поэтому только для блок-сополимеров типа (АВА)

и (AB) преализуются высокие прочности и хорошая эластичность, тогда как БСП (AB) ведут себя подобно невулканизированным каучукам.

Существуют четыре основных класса ТЭП [5]: полиолефины (обычно на основе смесей полипропилена с этиленпропиленовыми каучуками), полиуретаны, сополимеры простых и сложных эфиров и полистиролы.

Основным недостатком диен-стирольных ТЭП является их низкое сопротивление тепловому воздействию, действию масел и других жидкостей.

Специфическим недостатком ТЭП на основе полиуретанов является их чувствительность к действию влаги при переработке и эксплуатации, а преимуществом – износостойкость и стойкость к воздействию органических сред.

Полиолефиновые ТЭП превосходят по физико-механическим показателям все другие ТЭП, они совместимы с различными полимерами и имеют хорошую адгезию, но малоэластичны.

Полиэфирные ТЭП имеют высокую прочность (30–50 МПа), отличные масло- и атмосферостойкость, они стабильны в широком температурном интервале (от 223 до 433 К), хорошо перерабатываются экструзией, литьем и формованием под давлением. Применяются они в изделиях, работающих в среде горячих масел, для изготовления шлангов, пневмошин, прокладок.

Основными методами синтеза блок-сополимеров, в том числе и термоэластопластов, являются полимеризация по механизму «живущих» цепей и ступенчатая полимеризация (поликонденсация) [7–13]. Блок-сополимеры типа (АВА) обычно синтезируют методом анионной полимеризации по механизму «живущих» цепей, а БСП структуры (АВ)_п получают различными поликонденсационными методами.

Термоэластопласты представляют собой двухфазные блок-сополимеры, где каждый из блоков выполняет определенную функцию. Эластичный блок определяет гибкую эластомерную природу сополимера, а жесткий играет роль узлов физической сетки и наполнителя. Такое поведение является следствием двухфазности этих систем. Из-за микрофазового разделения жесткие блоки ассоциируют друг с другом, образуя маленькие дисперсные домены (0,01–0,02 мкм), которые химически связаны с каучуковой матрицей. Эти домены выполняют ту же функцию, что и химическая сетка в вулканизированных эластомерах [14].

Домены сетки ТЭП размягчаются или плавятся при температурах выше их температуры стеклования или плавления жесткого блока, и, таким образом, возможна переработка материалов через расплав. Другая функция жестких доменов заключается в повышении прочности путем усиления каучуковой матрицы. Это возможно из-за дискретной природы жестких доменов, их малых размеров и идеальной однородности по размеру, отличной адгезии между фазами, обусловленной наличием химических связей между блоками.

Свойства ТЭП зависят от молекулярной массы и объемной доли эластичных и жестких блоков [15–17]. Блоки должны быть достаточной длины, чтобы возникла двухфазная структура, однако не слишком длинными, чтобы при этом сохранялась термопластичность. Изменение соотношения жесткого и эластичного блоков влияет на модуль упругости и деформационно-прочностные свойства.

Термопластичные эластомерные свойства ТЭП делают их уникальными для многих областей промышленности – в производстве автомобилей и механизмов, в электротехнике и электронике, в производстве уплотнителей, уплотняю-

щих составов, клеев, обуви, искусственных органов и протезов, полупроницаемых мембран [18—22].

Полиэфирные термоэластопласты представляют собой сегментально-фрагментальныеполиблочные блок-сополимеры поликонденсационного типа [22], состоящие из жестких блоков сложного полиэфира и эластичных блоков алифатического простого полиэфира. Жесткие блоки ТЭП представляют собой кристаллизующиеся жирноароматические (полиэтилентерефталат, полибутилентерефталат и т.д.) сложные полиэфиры. В качестве эластичных блоков наряду с простыми алифатическими полиэфирами могут использоваться и сложные алифатические полиэфиры.

Наибольшее практическое значение среди полиэфирных ТЭП имеют блок-сополимеры на основе полибутилентерефталата и политетраметиленоксида. Эти термоэластопласты весьма удачно сочетают в себе свойства полибутилентерефталата и политетраметиленоксида, имеющих самостоятельное значение [23–30].

Как известно, полибутилентерефталат (ПБТ) является высококристаллическим термопластичным полимером конструкционного назначения с температурой плавления 496 ÷ 500 К и температурой стеклования 309 ÷ 322 К [31–33]. Степень кристалличности ПБТ составляет 50 %. Кристаллизация ПБТ из расплава протекает очень быстро, что позволяет проводить его переработку с коротким циклом. Высокая текучесть полимера дает возможность получить литьевые изделия с длинными или сложными литьевыми каналами. Плотность полимера равна 1270 ÷ 1310 кг/м². Известно использование ПБТ в качестве модификатора эпоксидных смол с целью повышения ударной вязкости [34]. Установлено, что ПБТ оказался в 2 раза более эффективным, чем ранее применяемые термопласты (ПА-6, поливинилиденфторид и др.).

Политетраметиленоксид (ПТМО) — простой эфир, который в зависимости от молекулярной массы представляет собой бесцветную вязкую жидкость или твердое бесцветное кристаллическое вещество со степенью кристалличности 33 ÷ 80 %, температурой плавления 314 ÷ 328 K, температурой стеклования 187 К и плотностью от 990 до 1180 кг/м³ [35].

Области применения полиэфирных ТЭП постоянно расширяются. Методом литья под давлением из них изготовлены шестерни программирующих машин, сепараторы подшипников электромоторов, подошвы спортивной обуви [36–40]. Методом экструзии получены различные при-

водные ремни, обладающие высоким коэффициентом трения, стойкостью к химическим продуктам, маслам и смазкам.

В связи с изложенным исследование термоэластопластов в качестве модификаторов эпоксидных полимеров представляет несомненный интерес, так как благодаря наличию эластичного блока в их составе можно ожидать увеличения ударостойкости и адгезионной прочности. Одновременное насыщение эпоксидной матрицы жесткими блоками БСП с высокой температурой размягчения позволяет рассчитывать на сохранение теплостойкости и модуля упругости.

Целью настоящей работы является исследование влияния модифицирующих добавок блоксополимеров полибутилентерефталат-политетраметиленоксид на статические и динамические релаксационные свойства эпоксидных композиционных материалов.

Методология. В качестве объектов исследования выбраны эпоксидные полимеры (ЭП) на основе диглицидилового эфира бисфенола А, которые получали отверждением промышленной смолы марки ЭД-20 с массовой долей эпоксидных групп менее 21,4 % и молекулярной массой 410. Отвердителем служил диэтилентриаминометилфенол марки УП-583Д.

В качестве модификаторов ЭП использовали блок-сополимеры полибутилентерефталат-политетраметиленоксид (ПБТ-ПТМО), синтез которых осуществляли в расплаве при 483–523 К в течение 4–6 ч. Исходными соединениями являлись диметилтерефталат, 1,4-бутандиол и политетраметиленоксид с молекулярной массой 2000. В качестве катализатора реакции использовали тетрабутоксититан. Процесс взаимодействия исходных компонентов осуществляли в две стадии, последовательно проводя реакцию переэтерификации и сополиконденсации.

$$(m+n) \, H_3C - O - C - O - CH_3 + 2(m+n) \, HO - (CH_2)_4 - OH + \\ + n \, HO - [-(CH_2)_4 - O -]_{\overline{2}8}H \longrightarrow m \, HO - (CH_2)_4 - O - C - O - (CH_2)_4 - OH + \\ + n \, HO - [-(CH_2)_4 - O]_{\overline{2}8} \, C - O - (CH_2)_4 - OH + 2(m+n) \, CH_3OH \\ + n \, HO - [-(CH_2)_4 - O]_{\overline{2}8} \, C - O - (CH_2)_4 - OH + 2(m+n) \, CH_3OH \\ - C - O - (CH_2)_4 - O - C - O - C - O - CH_2 - OH_2 - CH_2 - OH_2 - O$$

где т и п – коэффициенты уравнения.

В ходе реакции из расплава удаляется вначале метанол, а затем 1,4-бутандиол. Через 4-6 ч расплав выливали в воду для охлаждения. Далее полимер сушили при 373 К в течение 3 ч.

Состав БСП задавали соотношением исходных реагентов. Общая молекулярная масса БСП составляла 30–40 тысяч. Строение и состав ПБТ-ПТМО блок-сополимеров подтверждены данными элементного анализа, турбидиметрического титрования, гель-проникающей хроматографии, ИК- и ЯМР-спектроскопии. Подтверждением того факта, что в ходе реакции образуются БСП, а не смесь гомополимеров, является унимодальный характер кривых турбидиметрического титрования и гель-проникающей хроматографии. Состав и свойства ПБТ-ПТМО блок-сополимеров приведены в табл. 1.

Совмещение БСП с эпоксидной смолой осуществляли при 393 К. Отверждение продуктов совмещения проводили по режиму 293 К / 240 ч + 393 К / 3 ч.

Объекты исследования представляли собой пленки толщиной 100-150 мкм, полученные при отверждении полимерных композиций между двумя полированными поверхностями металлических плит, покрытых тонким слоем антиадгезива.

Запись кривых ползучести пленочных образцов проводили на установке [41] при постоянной растягивающей нагрузке 30 МПа. Динамические механические свойства (тангенс угла механических потерь $tg\ \delta$ и динамический модуль упругости E') измеряли на установке ДМА 983 термоаналитического комплекса DuPont 9900.

Таблица 1

Состав и свойства блок-сополимеров

Шифр	Содержа	ние бло-	Приведенная	Температура 5	Прочность	Удлинение	Модуль
образца	ков, масс. %		вязкость, $\eta_{\pi p}^{1}$,	% потери	при растя-	при раз-	упругости,
	ПБТ	ПТМО	дл/г	массы на воз- духе ²⁾ , К	жении, МПа	рыве ³⁾ , %	МПа
БТЭ-45	55	45	1,5	563	-	-	-
БТЭ-55	45	55	1,7	553	7,8	384	17
БТЭ-70	30	70	1,7	523	9,5	818	13
БТЭ-80	20	80	1,9	483	6,6	850	6,5

Примечания: ¹⁾ приведенная вязкость растворов БСП в смеси тетрахлорэтан: фенол (50 : 50 об. %); ²⁾данные термогравиметрического анализа; ³⁾измерено на пленочных образцах, полученных методом полива растворов БСП в хлороформе на целлофановую подложку. БТЭ-45 не обладает пленкообразующими свойствами.

Молекулярную массу участка цепи между узлами химической сетки (M_c) определяли по величине равновесного динамического модуля упругости E', измеренного при температуре $T = T_c + 50$ °C, по формуле [42]:

$$M_c = 3\rho RT/E_{B.9}$$

где R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура, ρ - плотность полимера.

Плотность узлов химической сетки n_c рассчитывали по формуле:

$$n_{\rm c} = \rho / M_{\rm c}$$

Основная часть. На рис. 1 приведены температурные зависимости тангенса угла механических потерь, из которых следует, что при введении блок-сополимеров ПБТ-ПТМО значительно снижается интенсивность как β-, так и αпереходов, что не является тривиальным фактом, поскольку сами БСП проявляют в очень широком диапазоне температур интенсивную молекулярную подвижность (рис. 1, кривая 5). При этом в случае β-релаксации большее снижение пика потерь имеет место для композиции, содержащей БТЭ-55, т. е. БСП с меньшей концентрацией эластомерного блока, тогда как интенсивность апика снижается пропорционально содержанию блока ПТМО в БСП (табл.2). Отметим, что использование одного ПТМО (рис. 1, кривая 4) приводит к еще большему, по сравнению с БСП, уменьшению β-перехода. Подобное явление может быть объяснено образованием при модификации ПТМО физической сетки за счет водородных связей концевых гидроксильных групп политетраметиленоксида и эпоксидного полимера, которая резко ограничивает подвижность оксиэфирного фрагмента цепи ЭП, вращением которого по механизму кренкшафта, обусловлено проявление β-релаксационного процесса [42]. При переходе из стеклообразного состояния в высокоэластическое в области α-перехода эта

физическая сетка разрушается и снимаются налагаемые ею ограничения на молекулярную подвижность. Вследствие этого интенсивность опика для образцов, содержащих ПТМО, выше, чем у модифицированных БСП.

Понижение интенсивности β-пика при введении БСП может быть связано с уменьшением доли оксиэфирных элементов. Вместе с тем, очевидно, что такое снижение должно определяться только количеством добавки, но не ее химическим строением. Поскольку эксперимент свидетельствует о зависимости эффекта от соотношения жесткого и гибкого блоков, то большее уменьшение tg δ при температурах ниже T_c , и, в частности, в области β-перехода, для композиций, модифицированных БСП с большим содержанием жесткого блока ПБТ, можно объяснить исходя из представлений о влиянии дисперсных наполнителей на релаксационные свойства ЭП. Как известно [43], наполнение приводит к уменьшению механических потерь пропорционально объемному содержанию наполнителя в полимере. Тогда, если рассматривать жесткие блоки ПБТ в качестве наполнителя ЭП, становится понятным наблюдаемая тенденция к большему снижению интенсивности β-перехода при увеличении концентрации жестких блоков в блок-сополимерах ПБТ-ПТМО.

Что касается механических потерь в области α-перехода, то их довольно значительное снижение (табл.2) при введении БСП (в 1,45 и 1,65 соответственно для БТЭ-55 и БТЭ-80) может быть объяснено суммированием ряда эффектов, а именно: 1) уменьшением доли эпоксидной составляющей; 2) ограничением свободы конформационных перегруппировок вблизи поверхностей раздела эпоксидный полимер – блоки ПБТ и ПТМО; 3) увеличением плотности поперечного сшивания (n_c) ЭП (табл. 3). Следует отметить, что в случае определения полноты отверждения ЭП

методом экстракции имеет место обратная картина: доля экстрагируемых веществ возрастает при введении БСП (а также ПТМО), что, по-ви-

димому, обусловлено вымыванием модифицирующих добавок при выдержке образцов в ацетоне (табл. 3).

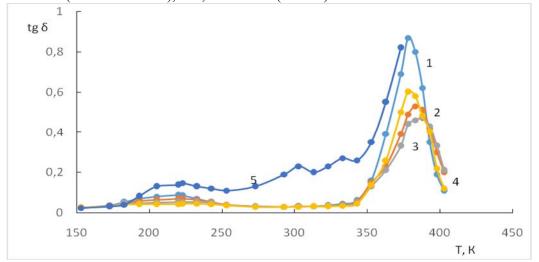


Рис. 1. Температурные зависимости тангенса угла механических потерь для исходного эпоксидного полимера (1), модифицированного 10 масс.ч. БТЭ-55 (2), БТЭ-80 (3), ПТМО (4) и исходного блок-сополимера БТЭ-80 (5)

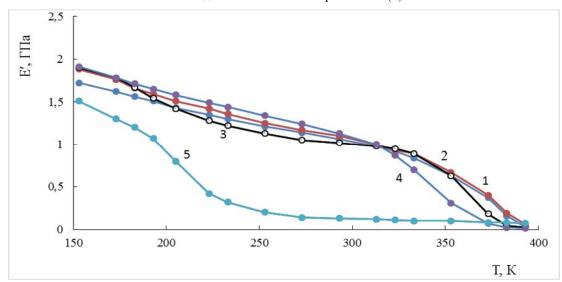


Рис. 2. Температурные зависимости динамического модуля упругости для исходного эпоксидного полимера (1), модифицированного 10 масс.ч. БТЭ-55 (2), БТЭ-80 (3), ПТМО (4) и исходного блок-сополимера БТЭ-80 (5)

Tаблица 2 Влияние модификаторов на релаксационные переходы в эпоксидном полимере

Параметры	Исход-	Исходный	ЭП, модифицированные 10 мас		
	ный ЭП	6ТЭ-80	Ч.		
			БТЭ-55	08-ЄТӘ	ПТМО
Максимальное значение тангенса угла меха-					
нических потерь в области β -перехода tg δ_{β}	0,087	0,147	0,068	0,054	0,046
Температура tg δ _β , К	220	223	223	222	227
Максимальное значение тангенса угла меха-					
нических потерь в области α -перехода tg δ_{α}	0,87	-	0,47	0,53	0,60
Температура tg δ_{α} , K	378	-	388	383	378

Как следует из рис.2, исходный термоэластопласт характеризуется существенно меньшим значением динамического модуля упругости, особенно в температурном диапазоне 220-350 K, по сравнению с исходным ЭП. В то же время введение БСП в эпоксидную матрицу способствует увеличению Е'. Наиболее отчетливо это проявляется при температурах ниже 200К. При T> 200К

для всех модификаторов, кроме БТЭ-80, также имеет место эффект увеличения Е'.

Представляло интерес оценить также влияние добавок ПБТ-ПТМО на статические релаксационные свойства. С этой целью при механическом напряжении 30 МПа и температурах 293 и 338 К исследовали ползучесть образцов, содержащих 10 масс. ч. модификатора на 100 масс. ч. эпоксидной смолы. Результаты представлены на рис. 3. Видно, что введение модифицирующих

добавок ПБТ-ПТМО уменьшает величину и скорость ползучести. Особенно значителен этот эффект при повышенной температуре испытания (338 К), что позволяет сделать вывод о расширении температурного интервала работоспособности при модификации эпоксидных полимеров термоэластопластом, представляющим блок-сополимер полибутилентерефталата с политетраметиленоксидом.

 Таблица 3

 Влияние модификаторов на полноту отверждения эпоксидных полимеров

Шифр образца	Концентрация, масс.ч., на 100 масс. ч.эпоксидной смолы	Плотность узлов химической сетки nc, моль/м3	Экстракция в ацетоне, %
1 ,		,	
БТЭ-45	0	0,81	1,42
	3	1,07	-
	5	1,16	-
	10	1,16	6,48
	15	1,16	-
БТЭ-55	10	1,18	7,50
БТЭ-70	10	1,19	5,84
	3	1,08	-
FTO 00	7	1,36	-
08-ЄТӘ	10	1,23	6,16
	15	1,22	-
птмо	3	1,35	-
ПТМО	10	0,68	8,1

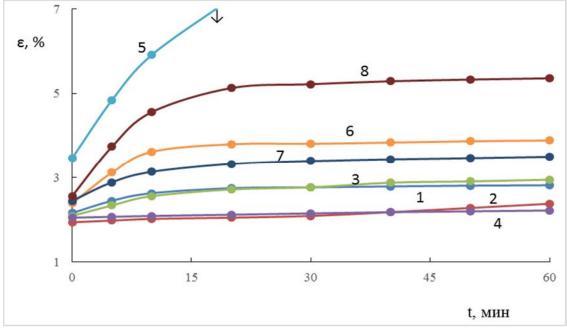


Рис. 3. Кривые ползучести исходного эпоксидного полимера (1, 5) и модифицированного 10 масс. ч. БТЭ-55 (2, 6), БТЭ-70 (3, 7), БТЭ-80 (4, 8). 1–4 – температура испытания 293 К. 5–8 – температура испытания 333 К. Приложенное напряжение 30 МПа.

Выводы. В результате проведенного исследования установлено, что введение блок-сополимеров ПБТ-ПТМО приводит к значительному

снижению интенсивности как β -, так и α -переходов, что не является тривиальным фактом, поскольку сами БСП проявляют в очень широком

диапазоне температур интенсивную молекулярную подвижность. При этом в случае β-релаксации большее снижение пика потерь имеет место для композиции, содержащей БСП с меньшей концентрацией эластомерного блока, тогда как интенсивность α-пика снижается пропорционально содержанию эластичного блока в термоэластопласте. Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены суммированием ряда эффектов, а именно: 1) уменьшением доли эпоксидной составляющей; 2) ограничением свободы конформационных перегруппировок вблизи поверхностей раздела эпоксидный полимер – блоки ПБТ и ПТМО; 3) увеличением плотности поперечного сшивания ЭП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Вольфсон С.И. ТЭП конструкционные материалы нового поколения // Химия и бизнес. 2001. № 1. С. 30–31.
- 2. Вольфсон С.И. Структура, свойства, применение термоэластопластов для композиционных материалов нового поколения // Вестник КГТУ. 2001. Спецвыпуск. С. 26–46.
- 3. Ношей А., Мак-Грат Дж. Блок-сополимеры. М.: Мир, 1980. 480 с.
- 4. Коврига В.В. Композиционные материалы в промышленности. Часть 3// Пласт. массы. 2003. № 1. С. 4–14.
- 5. Development in Block Copolymers / Ed by J. Goodman. London: Appl. Sci. Pub., 1982. 358 p.
- 6. Глуховской В.С., Попова Г.И., Сторожук И.П. Термоэластопласты с полярными блоками. М: ЦНИИТЭнефтехим, 1985. 43 с.
- 7. Southwiek J.G., Vonk W. For rigidity plus elasticity: styrenic block copolymers. Chem. Eng. 2002. Vol. 109, № 11. Pp. 50–53
- 8. Фирсова А.В., Карманова О.В., Ситникова В.В., Блинов Е.В. Бутадиен-α-метилстирольный термоэластоплат, синтез и свойства // Вестник ВГУИТ, 2016. №2. С.219–223.
- 9. Канаузова А.А., Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Термопластичные эластомеры для резинотехнической промышленности: получение свойства и перспективы применения // Материалы междун. научно-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и покрытия». Ярославль: Изд-во Ярославского гос. техн. ун-та. 2002. С. 135.
- 10.Huang H., Yang J.L., Liu X., Zhang Y. Dinamicalli vulcanized ethylene propylene diene termopolymer / nylon thermoplastic elastomers // Eur. Polym. J. 2003. Vol. 38, № 5. Pp. 857–861.
- 11.Liu F. Synthesis of poly (tret-butylacrilate) block-polystyrene-block- poly (4-vinilpyridine) by

- living anionic polymerization // Eisenberg Adi. Angew. Chem. Int. Ed. 2002. Vol. 42, № 12. Pp. 1404 1407.
- 12.Storey R.F., Baygh D.W., Choate K.R. Poly (styrene-b- isobutylene-b-styrene) block copolymers produced by living cationic polymerization // Polymer. 1999. Vol. 40, № 11. Pp. 3083–3090
- 13.Lu Z., Huang X. Hauang J. Synthesis, characterization and hydrolysis of PVA_c-PS-PVA_c via charge transfer polymerization // J. Polym. Sci. Ser. A. 1999. Vol. 37, № 14. Pp. 2595–2600.
- 14. Кимельблат В.И., Вольфсон С.И., Малышева Т.В. Зависимость свойств смесевых термоэластопластов от характеристик исходных полиолефинов // Химия и технология элементорганических соединений и полимеров. Межвуз. сборник научных трудов. Казань: Изд-во Казан. гос.
 технол. ун-та. 2002. С. 136–139.
- 15.Вольфсон С.И. Влияние рецептурно-технологических параметров на молекулярную структуру динамически вулканизованных ТЭП // Каучук и резина. 2003. № 6. С. 16–17.
- 16.Зеленев Ю.В. Исследование взаимосвязи состава, строения, структуры и физических свойств блок-сополимеров на основе гибко- и жесткоцепных компонентов // Пласт. массы. 2002. № 3. С. 11-18.
- 17.Liu B., Liu F., Luo N., Ying S.-K., Liu Q. Synthesis of block copolymer by internated living cationic polymerization (ATRP) // J. Polym. Sci. 2000. Vol. 18, № 1. Pp. 39 43.
- 18.Пат. 6500900 США, МПК⁷ С 08 L 23/26. Olefin thermoplastic elastomer, composition and use there of / Itoh Y.; Mitsui Chemicals, Inc.; заявл. 25.10.2000; опубл. 31.10.2002.
- 19.Пат. 6576699 США, МПК⁷ С 08 L 53/00. Damping resin composition and molded article using the same / Nakagawa H., Mizutani H., Koizumi J.; Toyoda Gosei Co., Ltd.; заявл. 26.11.1997; опубл. 10.06.2003.
- 20.Пат. 6184290 США, МПК⁷ С 08 L 47/00. Block copolymer compositions containing substantially inert thermoelastic extenders / Ahmed Wasif K., Batistini A., Betso S.R., Guest M.J.; The Dow Chemical Co.; заявл. 16.12.1997; опубл. 06.02.2001.
- 21.Schmalz H., Abetz V., Stalder R., Lange R., Schmidt A. Thermoplastic elastomers based on ABA triblock copolymers and a polyester // 38th Macromolecular IUPAC Symposium, Warsaw, 9 14 July, 2000. Book Abstr. Vol. 3. P. 989.
- 22.Валецкий П.М., Сторожук И.П. Блок-сополимеры поликонденсационного типа // Успехи химии. 1979. Т. 48, № 1. С. 75–114.
- 23.Pat. 6268438 CIIIA, MΠK⁷ C 08 L 23/00. Thermoplastic elastomeric compositions / Ellul M.D., Hazelton D.A., Cozewith C., Mehta A.K.;

- Exxon Mobil Chemical Patents Inc.; Publ. 31.07.2001.
- 24. Гусева Л.Р. Выставка Химия-97: новые материалы новые возможности // Пласт. массы. 1997. № 4. С. 47–50.
- 25.Lloyd I.R. Polyester elastomers // Dev. Rubber Technol. Vol. 3. London, New York, 1982. Pp. 183–201
- 26. Walker B.M. Thermoplastic elastomers overview and trends // J. Elastom. And Plast. 1982. Vol. 14, № 3. Pp. 139–147.
- 27. Алакаева З.Т., Микитаев М.А., Леднев О.Б. Термические свойства нанокомпозитных блок-сополимеров на основе полибутилентерефталата и политетраметиленоксида // Современные наукоемкие технологии. 2012. №10. С. 12—15.
- 28.Микитаев А.К., Сторожук И.П. Полибутилентерефталат, полиэфирные термоэластопласты, композиционные материалы на их основе // Пласт. массы. 1999. №1. С. 30.
- 29.Патент 2389743 Россия МПК С08L63/00, С08L71/02 Эпоксидные смолы, упрочненные амфильными блок-сополимерами, и порошковые покрытия, выполненные на их основе / Верхгесе К.И., Франка М; Дау глобал технолоджиз инк. (US). №2007121664; заявл. 11.12.2005; опубл. 20.05.2010, Бюл. №14. 21с.
- 30.Сторожук И.П. Блок-сополимеры поликонденсационного типа на основе полиэфиров и ряда других полимеров. Дис. д-ра хим. наук. М., 2002. 541с.
- 31.Шелгаев В.Н., Микитаев А.К., Ломакин С.М. и др. К вопросу о термостабильности полибутилентерефталата // Пласт. массы. 2002, № 3. С. 29–32.
- 32.Сторожук И.П., Шелгаев В.Н., Микитаев А.К., Алакаева З.Т. Разработка отечественного полибутилентерефталата с улучшенными характеристиками // Пласт. массы. 2002. № 2. С. 23—27.

- 33. Калинчев Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. Л.: Химия, 1983. 288c.
- 34.Kim Junkyung, Robertson R. E. Possible phase transformation toughening of thermoset polymers by poly (butulene terephthalate) // J. Mater. Sci. 1992. Vol. 24, № 17. Pp. 3000–3009
- 35. Розенберг Б.А. Тетрагидрофурановые полимеры // Энциклопедия полимеров: В 3 Т. М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 1. С. 641–643
- 36.Henderson J.L. Polyester elastomer: The designer's link between rubber and plastics // Plast. Eng. 1983. Vol. 39, № 6. Pp. 31–37.
- 37.Михайлов А.М., Галкин А.А. Изготовление изделий из термоэластопластов методами экструзии и литья под давлением // Материалы междун. научно-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и покрытия». Ярославль: Изд-во Ярославского гос. техн. ун-та. 2002. С. 137–138.
- 38.Пат. 6384123 США, МПК⁷ С 08 К 3/34. Thermoplastic elastomer film composition / Young R.E.; RJF International Corp.; заявл. 14.07.2000; опубл. 07.05.2002.
- 39.Пат. 6384123 США, МПК⁷ С 08 F 210/3400. Thermoplastic crosslinked product and heat-sensitive elastic adhesive / Chiba M., Takase J.; Капека Согр.; заявл. 30.05.2000; опубл. 30.07.2002
- 40.Пат. 6521704 США, МПК⁷ С 08 L 51/00. Vibration dampening compositions and methods there of / Hubbard S.F., Ting Sai-Pei.; General Electric Co.; заявл. 06.08.2002; Опубл. 18.02.2003
- 41. Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1978. 336 с.
- 42.Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973. 296 с.
- 43.Мэнсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты: Пер. с англ. Под ред. Ю.К. Годовского. М.: Химия, 1979. 440 с.

Информация об авторах

Кочергин Юрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры общеинженерных дисциплин. E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Григоренко Татьяна Ильинишна. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Золотарева Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров E-mail: viktoria802@gmail.com. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Поступила в ноябре 2019 г.

© Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В., 2020

Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V.

Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky Ukraine *E-mail:yuriev_ag@mail.ru

RELAXATION PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF EPOXY POLYMERS AND THERMOPLASTIC ELASTOMERS

Abstract. The influence of thermoplastic elastomers, which are two-block statistical block copolymers based on polybutylene terephthalate and polytetramethylene oxide with a different ratio of rigid and elastic blocks, on the static and dynamic mechanical properties of epoxy polymers is studied. The initial compounds for the synthesis of block copolymers are dimethyl terephthalate, 1,4-butanediol and polytetramethylenoxide with a molecular weight of 2000. The tetrabutoxide is used as catalyst. The process of interaction of the initial components is carried out in two stages, the reaction of transesterification and copolycondensation is consistently carried out. The composition of BSP is set by the ratio of initial reagents. The total molecular weight of block copolymers is 30-40 thousand. The method of dynamic mechanical analysis shows that the introduction of modifiers leads to a decrease in molecular mobility in a wide temperature range from low-temperature (at 220K) to high-temperature (at 380K) relaxation transitions. The magnitude of the effect depends on the ratio of rigid and flexible blocks in the block copolymer. It is assumed that the decrease in the tangent of the angle of mechanical losses at temperatures below the glass transition temperature and especially in the region of the β -transition, may be associated with the slowdown of relaxation processes at the interface of the epoxide matrix with rigid blocks of thermoplastic elastomer. The observed effects in the region of high-temperature transition may be associated with the restriction of freedom of conformational rearrangements near the interface of the epoxy polymer with polybutylene terephthalate and polytetramethylene oxide blocks and an increase in the cross-linking density of the epoxy. A noticeable decrease in the magnitude and creep rate of epoxy composites is found when thermoelastoplast is introduced.

Keywords: epoxy polymer, thermoplastic elastomer, block copolymer polybutylene terephthalate-polytet-ramethylene oxide, relaxation transitions, creep.

REFERENCES

- 1. Wolfson S.I. TEP-constructional materials of new generation [TEP konstrukcionnye materialy novogo pokoleniya]. Chemistry and business. 2001. No. 1. Pp. 30–31. (rus)
- 2. Wolfson S.I. Structure, properties and applications of thermoplastic elastomers for composite materials of new generation Bulletin of KSTU [Struktura, svojstva, primenenie termoelastoplastov dlya kompozicionnyh materialov novogo pokoleniya]. 2001. Special issue. Pp. 26–46. (rus)
- 3. Burden A., McGrath J. Block copolymers [Blok-sopolimery]. Moscow: Mir, 1980. 480 p. (rus)
- 4. Kovriga V. V. Composite materials in the industry. Part 3 [Kompozicionnye materialy v promyshlennosti. CHast' 3]. Plast. Masses. 2003. No. 1. Pp. 4–14. (rus)
- 5. Development in Block Copolymers. Ed by J. Goodman. London: Appl. Sci. Pub., 1982. 358 p.
- 6. Glukhov V.S., Popov G.I., Storozhuk I.P. thermoplastic Elastomers with polar blocks [Termoelastoplasty s polyarnymi blokami]. -M: Tsniiteneftekhim, 1985. 43 p. (rus)
- 7. Southwick, J. G., Von Willem. For rigidity plus elasticity: styrenic block copolymers. Chem. Eng. 2002. Vol. 109, No. 11. Pp. 50 53
- 8. Firsova A.V., Karmanova O.V., Sitnikova V.V., Blinov E. V. Synthesis and properties of butadi-

- ene- alpha-metylstyrene thermoplastic elastomer [Butadien- α -metilstirol'nyj termoelastoplat, sintez i svojstva]. Proceeding of VSUET, 2016. No. 2. Pp. 219–223. (rus)
- 9. Kanauzova A.A., Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. Thermoplastic elastomers for rubber industry: obtaining properties and prospects of application [Termoplastichnye elastomery dlya rezinotekhnicheskoj promyshlennosti: poluchenie svojstva i perspektivy primeneniya]. Materials international. science and technology. Conf. "Polymer composite materials and coatings". Yaroslavl: Publishing house of Yaroslavl state technical University. UN-TA. 2002. Pp. 135. (rus).
- 10.Huang H., Yang J.L., Liu X., Zhang Y. Dinamicalli vulcanized ethylene propylene diene termopolymer/nylon thermoplastic elastomers. Eur. Polym. J. 2003. Vol. 38, No. 5. Pp. 857–861.
- 11.Liu F. Synthesis of poly(tret-butylacrilate) block-polystyrene-block- poly(4-vinilpyridine) by living anionic polymerization. EisenbergAdi. Angew. Chem. Int. Ed. 2002. Vol. 42, No. 12. Pp. 1404–1407.
- 12.Storey R.F., Baygh D.W., Choate K.R. Poly(styrene-b- isobutylene-b-styrene) block copolymers produced by living cationic polymerization. Polymer. 1999. Vol. 40, No 11. Pp. 3083 3090
- 13.Lu Z., Huang X. Hauang J. Synthesis, characterization and hydrolysis of PVA_c-PS-PVA_c via charge transfer polymerization. J. Polym. Sci. Ser. A. 1999. Vol. 37, No. 14. Pp. 2595–2600

- 14.Kimelblat V. I., Wolfson S. I., Malysheva T. V. Dependence of properties of mixed thermoplastic elastomers on characteristics of initial polyolefins [Zavisimost' svojstv smesevyh termoelastoplastov ot harakteristik iskhodnyh poliolefinov]. Chemistry and technology of Organoelement compounds and polymers. Intercollegiate. collection of proceedings. Kazan: Kazan publishing House. state technol. UN-TA, 2002. Pp. 136–139. (rus)
- 15. Wolfson S.I. The impact of prescription-technological parameters on the molecular structure of dynamically vulcanised thermoplastic elastomers [Vliyanie recepturno-tekhnologicheskih parametrov na molekulyarnuyu strukturu dinamicheski vulkanizovannyh TEP]. Kauchuk i Rezina, 2003. No. 6. Pp. 16–17. (rus)
- 16.Zelenev Yu.V. Study of the relationship between the composition, structure, structure and physical properties of block copolymers based on flexible and rigid-chain components [Issledovanie vzaimosvyazi sostava, stroeniya, struktury i fizicheskih svojstv blok-sopolimerov na osnove gibko- i zhestkocepnyh komponentov]. Plast. Masses, 2002. No. 3. Pp. 11–18. (rus)
- 17. Liu B., Liu F., Luo N., Ying S.-K., Liu Q. Synthesis of block copolymer by internated living cellular polymerization (ATRP). J. Polym. Sci., 2000. Vol. 18, No 1. Pp. 39–43
- 18.Itoh Y. Olefin thermoplastic elastomer, composition and use of there. Pat. USA, no.6500900, 2002
- 19. Nakagawa H., Mizutani H., Koizumi J. Damping resin composition and molded article using the same. Pat. USA, no.6576699, 2003.
- 20.Ahmed W.K., Batistini A., Betso S.R., Guest M.J. Block copolymer compositions containing substantially inert thermoelastic extenders Pat. USA, no. 6184290, 2001
- 21.Schmalz H., Abetz V., Stalder R., Lange R., Schmidt A. Thermoplastic elastomers based on ABA triblock copolymers and a polyester. 38th Macromolecular IUPAC Symposium, Warsaw. Book Abstr., 2000. Vol. 3. P. 989
- 22. Valetsky P. M., Storozhuk I. P. Block copolymers of polycondensation type [Blok-sopolimery polikondensacionnogo tipa]. Uspekhi khimii, 1979. Vol. 48, No. 1. Pp. 75-114. (rus)
- 23.Ellul M. D., Hazelton D. A., Cozewith C., Mehta A. K. Thermoplastic elastomeric compositions. Pat. USA, no. 6268438, 2001
- 24.Guseva L.R. Exhibition Chemistry-97: new materials-new opportunities [Vystavka Himiya-97: novye materialy novye vozmozhnosti]. Plast. Masses, 1997. No. 4. Pp. 47–50. (rus)
- 25.Lloyd I.R. Polyester elastomers. Dev. Rubber Technol. Vol. 3. London, New York, 1982. Pp. 183–201

- 26. Walker B. M. Thermoplastic elastomers-overview and trends. J. Elastom. and Plast., 1982. Vol. 14, No 3. Pp. 139–147
- 27. Alakaeva Z. T., Mikitaev M. A., Lednev O. B. Thermal properties of nanocomposite block copolymers based on polybutylene terephthalate and polytetramethylene oxide [Termicheskie svojstva nanokompozitnyh blok-sopolimerov na osnove polibutilentereftalata i politetrametilenoksida]. Modern science-intensive technologies. 2012. No. 10. Pp. 12–15. (rus)
- 28.Mikitaev A. K., Storozhuk I. P. Polybutyleneterephthalate, polyester thermoplastic elastomers, composite materials based on them [Polibutilentereftalat, poliefirnye termoelastoplasty, kompozicionnye materialy na ih osnove]. Plast. Masses, 1999. No. 1. P. 30. (rus)
- 29. Verhges K.I., Franka M.Z. Epoxy resins reinforced with amphilic block copolymers and powder coatings made on their basis. Patent RF, no. 2389743, 2010. (rus)
- 30.Storozhuk I.P. Block copolymers of polycondensation type based on polyesters and a number of other polymers [Blok-sopolimery polikondensacionnogo tipa na osnove poliefirov i ryada drugih polimerov]. Dissertationfor the degree of doctor of chemistry sciences. Moscow, 2002. 541 p. (rus)
- 31. Sergeev V.N., Mikitaev A.K., Lomakin S.M. The question of the thermal stability of the polybutylene terephthalate [K voprosu o termostabil'nosti polibutilentereftalata]. Plast. Masses, 2002. No. 3. Pp. 29–32. (rus)
- 32.Storozhuk I.P., Sergeev V.N., Mikitaev A.K., Alakaeva Z.T. The development of polybutyleneterephthalate with improved performance [Razrabotka otechestvennogo polibutilentereftalata s uluchshennymi harakteristikami]. Plast. Masses. 2002. No. 2. Pp. 23–27. (rus)
- 33.Kalinchev E.L., Sakovtseva M.B. Properties and processing of thermoplastics [Svojstva i pererabotka termoplastov]. L.: Chemistry, 1983. 288 p. (rus)
- 34.Kim Junkyung, Robertson R. E. Possible phase transformation toughening of thermoset polymers by poly (butulene terephthalate). J. Mater. Sci. 1992. Vol. 24, No. 17. Pp. 3000–3009.
- 35.Rosenberg B.A. Tetrahydrofuran polymers [Tetragidrofuranovye polimery] encyclopedia of polymers: In 3 Vols. M.: Soviet encyclopedia, 1977. Vol. 1. Pp. 641–643. (rus)
- 36.Henderson J.L. Polyester elastomer: the designer's link between rubber and plastics. Plast. Eng. 1983. Vol. 39, No. 6. Pp. 31–37
- 37.Mikhailov A.M., Galkin A.A. The manufacture of products from thermoplastic elastomers by extrusion and injection molding [Izgotovlenie izdelij iz termoelastoplastov metodami ekstruzii i lit'ya pod

davleniem]. Proceedings of the international. science and technology. Conf. "Polymer composite materials and coatings". - Yaroslavl: Publishing house of Yaroslavl state technical University. UN-TA., 2002. Pp. 137–138. (rus)

- 38. Young R.E. Thermoplastic elastomer film composition. Pat. USA, no. 6384123, 2002.
- 39.Kaneka Corp., Chiba M., Takase J. Thermoplastic crosslinked product and heat-sensitive elastic adhesive. Pat. USA, no. 6384123, 2002.
- 40.Hubbard S.F., Ting Sai-Pei. Vibration dampening compositions and methods thereof. Pat. USA, no. 6521704, 2003.
- 41.Malkin A.Ya., Askadsky A.A., Kovriga V.V. Methods of measurement of mechanical properties of polymers [Metody izmereniya mekhanicheskih svojstv polimerov]. M.: Chemistry, 1978. 336 p. (rus)
- 42.Perepechko I.I. Acoustic methods of polymer research [Akusticheskie metody issledovaniya polimerov]. M.: Chemistry, 1973. 296 p. (rus)
- 43. Manson G., Sperling L. Polymer mixtures and composites [Polimernye smesi i kompozity]: Trans. Edited by Y. K. Godovsky. M.: Chemistry, 1979. 440 p. (rus)

Information about the authors

Kochergin, Yuri S. PhD, Professor. E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31

Grigorenko, Tat'yana I. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Zolotareva, **Victoriya V.** PhD, Assistant professor. E-mail: viktoria802@gmail.com Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Received in November 2019

Для цитирования:

Кочергин Ю.С., Григоренко Т.И., Золотарева В.В. Релаксационные свойства композиционных материалов на основе смесей эпоксидных полимеров и термоэластопластов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 85–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-85-95

For citation:

Kochergin Y.S., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. Relaxation properties of composite materials based on mixtures of epoxy polymers and thermoplastic elastomers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 85–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-85-95

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-96-105

¹,*Ключникова Н.В., ¹Пискарева А.О., ¹Урванов К.А., ¹Гордеев С.А., ²Генов И.
¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
²Фонд науки и образования Болгария
*E-mail: 4494.55@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ШУНГИТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. Полимеры всё чаще вытесняют привычные материалы, такие как дерево, металлы, натуральные волокна. Причиной этому служит ряд преимуществ полимерных материалов перед классическими: повышенная химическая стойкость к агрессивным средам, высокие показатели прочности, долговечность в эксплуатации изделий. Стоит отметить, что полимерные материалы активно используются также и в пищевой промышленности.

Использование полимерной упаковки достигает глобальных масштабов. Совершенствование технологий производства и рецептур позволяет создавать новые полимерные композиты с улучшенными свойствами, что даёт стремительный рост полимерной промышленности.

Для придания необходимых свойств в полимерный материал вводят наполнители. Посредством ввода в полимер таких добавок можно контролировать свойства получаемого материала, например, вязкость, плотность, прозрачность, бактерицидность и другие немаловажные свойства.

В статье рассматривается влияние шунгита на эксплуатационные свойства готового композита на основе полиэтилена низкого давления.

Результаты исследований показали, что полученный композит обеспечивает наиболее высокие характеристики в отношении отражения и поглощения света, для всех имеющих значение при эксплуатации областей длин волн, обладает бактерицидными свойствами, доказано, что в шунгитонаполненном полимере наблюдается сдвиг температуры начала термодеструкции в сторону более высоких температур. Композит приобретает более высокие эксплутационные и физико-механические свойства.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал (ПКМ), полимер, полиэтилен низкого давления, шунгит.

Введение. На сегодняшний день упаковка является самой широкой и востребованной областью применения полимерных материалов [1]. Обуславливается это тем, что полимерные материалы просты в обработке и изготовлении, устойчивы к разбиванию, обладают небольшой массой и стоимостью, устойчивы к воздействию различных химических веществ, просты в изготовлении в мелкосерийном и серийном производстве, обладают невысокой стоимостью, а также пластиковая тара довольно гибка в проектировании, что позволяет получить формы изделия, которые невозможно получить при использовании традиционных материалов [2].

При использовании полимеров в качестве упаковки существуют и недостатки: появление постороннего запаха, старение под действием агрессивных сред и ультрафиолетового излучения (фотостарение), сложность идентификации при утилизации, возможность миграции органических компонентов в продукцию [3].

Для реализации быстрого, массового и относительно дешевого производства полимерных материалов, которые могут быть применены в пищевой или иной другой промышленности, используемые исходные компоненты необходимо обеспечить хорошими эксплуатационными свойствами, легкой перерабатываемостью и соответствующей технологичностью, а также обеспечить приемлемое равновесие между жёсткостью и пластичностью [4].

Для достижения этих целей, в процессе создания полимерных композиционных материалов в качестве наполнителей вводятся структурно-активные добавки, имеющие развитую удельную поверхность. Таким образом можно осуществить регулирование функциональных свойств композиционных материалов с целью эксплуатации в различных условиях [5].

Характеристики наполненных полимерных композиционных материалов имеют прямую зависимость от свойств дисперсного наполнителя и свойств полимерной матрицы, а также их взаимодействия на границе раздела. Вследствие этого взаимодействия происходит увеличение температур стеклования и текучести из-за снижения в граничном слое подвижности макромолекул и их сегментов. [6, 7].

Так как на сегодняшний день проблема взаимодействия наполнителей и матриц крайне многогранна, научные исследования в сфере полимерного материаловедения обуславливают становление технологии композиционных полимерных материалов. В современном миреиспользуются полимерные композиционные материалы не только в технике, но и в повседневной жизни, поэтому знание основных свойств и качеств этих материалов и способность правильно их применять со временем становится все более актуальным [8].

Полимерная матрица (связующее, дисперсная среда) – главный элемент полимерного композиционного материала, определяемый условия при изготовлении композита и его характеристик при эксплуатации [9–10].

На сегодняшний день, одной из главных задач является создание термопластичных матриц для ПКМ, во многом определяющих свойства готовых ПКМ. Основной функцией матрицы, является связывание волокон друг с другом, благодаря чему ПКМ приобретает прочную монолитную конструкцию. За счет дисперсности частиц и высокой пластичности, она защищает мелкодисперсный наполнитель от неблагоприятного воздействия окружающей среды. Помимо этого, полимерная матрица принимает нагрузки и передает их частицам второй фазы, после этого происходит перераспределение между волокнами и дисперсными частицами [11-12].

От таких свойств полимерной матрицы как: термостойкость, прочность, вязкость разрушения, огне, водо- и атмосферостойкость, жесткость, ударная прочность, пластичность, температурное поведение, ударная вязкость, химическая стойкость зависит качество реализации физико-механических и эксплуатационных свойств [13]. Стоит отметить, что при разработке полимерных термопластичных связующих решающую роль играют их технологические свойства (усадка, смачиваемость армирующего материала, кинетика отверждения, вязкость и давление переработки, и т.д.).

Из-за того, что необходимо формулировать широкий комплекс противоречивых требований к полимерному связующему, разработка матриц, подходящих для конкретного применения, ограничена. Например, из-за необходимости детального описания процесса разрушения, разнообразия механизмов разрушения полимерных композиционных материалов и исследования образцов в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации материала в готовом изделии, довольно сложно установить соответствующие требования к физико-механическим характеристикам термопластичной матрицы для достижения максимальной прочности композиционных материалов [14].

ПКМ по химической природе связующих подразделяются натермореактивные и термопластичные полимеры.

Отличительной особенностью термореактивных полимеров (реактопластов) является необратимость перехода в стеклообразное состояние с пространственной сетчатой структурой при нагреве. Полимерную часть реактопласта называют «смолой» [15].

В число термореактивных полимеров входят: карбамидные, эпоксидные, фенолоальдегидные, полиуретановые, а также ненасыщенные полиэфирные смолы. Для того, чтобы получить ПКМ используют полимеры вместе с добавками.

Термопластичные полимеры (термопласты) — полимерные материалы при обычной температуре находящиеся в твёрдом состоянии, однако способные обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние за счет макромолекул, которые имеют слаборазветвленную или линейную форму с физическими связями между макромолекулами, сохраняя при этом основные физические свойства полимера. Благодаря этим уникальным свойствам становится возможным получение изделий из расплава, а также вторичная переработка полимеров [16].

В число термопластичных полимеров входят: полиамиды, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, полистирол, поликарбонаты, полиформальдегид, полиолефины (полиэтилен, полипропилен) и т.д. [17].

Проанализировав вышеизложенную информацию, опираясь на цель исследования, предпочтение было отдано термопластичному связующему. Стоит отметить, что ПМ на основе полиэтилена низкого давления являются приоритетными при создании ПКМ для производства тары и плёнок. Это обусловлено уникальными свойствами ПЭНД, а именно высокой химической инертностью, малой плотностью, повышенными механическими свойствами и другими качественными характеристиками. К главным достоинствам изделий на основе ПЭНД можно отнести срок службы около 40 лет; отсутствие специального ухода; высокая эластичность, малый вес, низкая стоимость производства, высокие экологические свойства

Его выбор обусловлен условиями эксплуатации изделия, технологическими свойствами, а также стоимостью и доступностью пластмассы.

В настоящее время активно ведется поиск дисперсных наполнителей, способных существенно повысить эксплуатационные свойства крупнотоннажных термопластов [18].

Характеристика	дисперсных	наполнителей
----------------	------------	--------------

Наполнитель	Плотность, кг/м3	Модуль упругости, ГПа	Температура, °С	Стоимость, руб/кг	Объем производства, т
Сажа	50-500	_	1000	40	885 тыс
Мел	1400–2700	6-9	920 (Tp)	5,50	3381 млрд
Шунгит	2250-2400	31	500	20	2 млрд
Тальк	2788	3,5	1500 (Тпл)	41	100 тыс

Сравнивая свойства наиболее используемых дисперсных наполнителей (табл. 1), явно видны преимущества шунгита. Лидирующую позицию среди прочих занимает мел, обусловлено это его крайне низкой стоимостью. Однако беря во внимание то, что зачастую продукты питания нельзя хранить под прямыми солнечными лучами в приоритете будет полимер, в котором наполнителем выступает шунгит или сажа, так как он непрозрачен, что дает ему неоспоримое преимуществом перед полимером наполненным мелом или тальком. В тоже время сажа уступает шунгиту в выборе наполнителя для пищевой промышленности, так как является канцерогеном. В отличие от технического углерода, содержащего вредные токсичные вещества, которые приводят к изменению клеток на генетическом уровне, шунгит обладает бактерицидными свойствами.

Основная часть. Для получения композиционного полимерного материала выбор был остановлен на полиэтилене низкого давления и природном минерале шунгите (рис. 1).



Рис. 1. Структура шунгита

Присутствие фуллереноподбных структур обуславливает большую концентрацию парамагнитных центров (1019 спин/г) в минерале. Значительная концентрация парамагнитных центров характеризует повышенную активность шунгита в окислительно-восстановительных реакциях, что делает перспективным его применение в полимерных материалах с целью повышения их

стойкости к окислению, тепло- и термостойкости.

Одно из основных достоинств шунгита заключается в том, что данный минерал полностью состоит из биполярных высокодисперсных частиц. Такое уникальное свойство минерала позволяет хорошо внедрять шунгит в качестве наполнителя в разнообразные полимерные материалы. Наполненные шунгитом ПКМ обладают высокой износостойкостью по сравнению с другими полимерными композитами, например, при близких по значению степенях диспергирования и наполнения кварцевый наполнитель уступает в физико-механических свойствах шунгиту.

Полученный полимерный композиционный материал предполагается использовать для строительной и пищевой промышленности, поэтому он должен быть фотоустойчивым, бактерицидным, термостойким и прочным [19].

Эксплуатационные и физико-механические свойства ПКМ, были исследованы на пленочных образцах с содержанием шунгита от 1,0 до 10 %, и на брусках с содержанием шунгита от 10 до 40 %.

Способность материала вызывать гибель грибов-деструкторов за счёт введения в его состав определённого биоцида называется фунгицидностью полимерного композита. Способность не утилизироваться (не служить источником питания) грибами-деструкторами, т.е. быть биостойкой называется грибостойкостью ПКМ.

Оценка грибостойкости полимерного композита производилась в соответствии с ГОСТ 9.049–91 (пластмассы, пластики, компаунды, резины, клеи, герметики). Испытания материала проводились как по стандартной методике (к ассоциативной культуре микромицетов), так и модифицированным методом (к отдельным видам грибов)

Грибостойкость образцов оценивалась по интенсивности развития грибов по пятибалльной шкале ГОСТ 9.048-89 (табл. 2).

Все образцы материала являются грибостойким по отношению ко всем девяти тест-культурам, а также к ассоциативной культуре оценка устойчивости не превышала 0—3 баллов (табл. 3).

Таблица 2

Оценка интенсивности развития грибов

Балл	Характеристика балла
0	Прорастание спор и конидий под микроскопом не обнаружено
1	Проросшие споры и незначительно развитый мицелий видны под микроскопом
2	Развитый мицелий, возможно спороношение заметны под микроскопом
3	Невооружённым глазом мицелий и (или) спороношение едва заметны, но отчётливо
	видны под микроскопом
4	Развитие грибов, покрывающих менее 25 % испытуемой поверхности, отчётливо
	видно невооружённым глазом
5	Рост грибов, покрывающих более 25 % испытуемой поверхности, отчётливо
	видно невооружённым глазом

Таблица 3

Грибостойкость ПКМ

	Степень обрастания в баллах					
Вид гриба	ПЭНД	ПЭНД+5 %	ПММА+10 %	ПММА+26 %		
		шунгита	шунгита	шунгита		
AspergillusterreusThom	4	3	2	2		
AspergillusnigervanTieghem	3	2	2	1		
Aspergillusoryzae (Ahlburg) Cohn	2	0	0	0		
PenicilliumchrysogenumThom	4	2	1	0		
TrichodermaviridePersoon	4	3	3	2		
Ассоциативная культура	2	0	0	0		

Бактерицидная и антимикологическая активность изготовленного композита обуславливается, ион-радикальной активностью шунгита, а также наличием в его составе фуллеренов, что чрезвычайно важно при создании материалов для пищевой промышленности, которые по рекомендации ГОСТа должны быть устойчивы к воздействию агрессивных биологических сред.

Без определения термостабильности полимерного композита невозможно установить правильный интервал его переработки, который находится между температурами текучести и деструкции, а также грамотно оценить его эксплуатационные свойства. Химические превращения, при которых масса образца снижается, обуславливаются термической и термоокислительной деструкцией, за счет снижения молекулярной массы из-за разрыва химических связей в макромолекулах, выделения летучих продуктов деструкции, а также изменением окраски, уменьшением прочности ПКМ и др [20]. Дифференциальный термический анализ показал, что с увеличением содержания шунгита происходит смещение температуры деструкции в сторону высоких температур (рис. 2-3). Стоит отметить, что температура деструкции полиэтилена низкого давления равна 320 °C, при введении 3 % шунгита она достигает 438,7 °C, а при введении 26 % шунгита равна 441,6 °C.

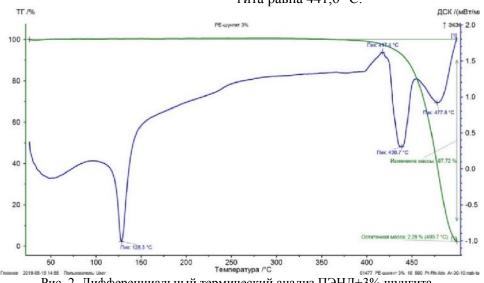


Рис. 2. Дифференциальный термический анализ ПЭНД+3% шунгита

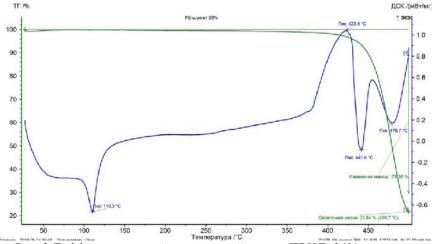


Рис. 3 Дифференциальный термический анализ ПЭНД+26% шунгита

Более высокие температуры деструкции ПКМ, наполненного шунгитом, связаны с наличием радикальных и ион-радикальных центров на поверхности минерала, которые блокируют активные радикалы ПЭНД, что приводит к их рекомбинации, а, следовательно, к повышению термостойкости [20].

Упаковочные материалы, в том числе пленочные, при хранении подвергаются воздействию ультрафиолетовых лучей. Устойчивость к фотостарению является обязательной характеристикой данного полимерного композиционного материала.

При использовании полимерных материалов для упаковки пищевых продуктов обычная мера для достижения лучших светозащитных свойств заключается в добавлении к полимерному материалу светоотражающих и/или светопоглощающих агентов. В рамках данной работы эту функцию выполняет шунгит.

Исследование устойчивости образцов к воздействию ультрафиолетового излучения прово-

дилось с помощью вакуумной настольной установки «VSE-UV.c». Образцы выдерживались в ультрафиолете (300—400 нм) в течение 3 циклов по 8 часов, изменений и дефектов не было обнаружено (рис. 3), что свидетельствует о высокой стойкости материала к солнечному свету. Так же фотостарение отсутствует у образцов, которые выдерживались в экстремальном ультрафиолете (120—10 нм) в течении 24 часов (рис. 4—7).

Таким образом, был создан полимерный композит, обеспечивающий наиболее высокие характеристики в отношении отражения и поглощения света, для всех имеющих значение при эксплуатации областей длин волн.

Одной из важных характеристик механических свойств ПКМ является предел текучести. При испытании измеряли нагрузку и удлинение универсального образца в момент достижения предела текучести. Показатель предела текучести был исследован согласно ГОСТ 14236-81на универсальной испытательной машине для проведения механических испытаний фирмы Galdabini.

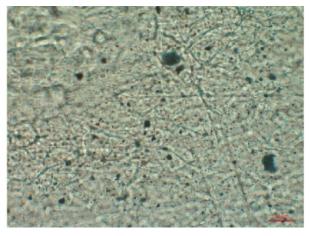


Рис. 4 Пленка с содержанием 2 % шунгита после облучения, 20 нм



Рис. 5. Пленка с содержанием 2 % шунгита после облучения, 200 нм

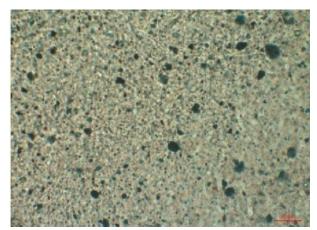


Рис. 6 Пленка с содержанием 4 % шунгита после облучения, 20 нм

Предел текучести определяли по формуле:

$$S_{x} = \frac{F_{r}}{A_{s}},\tag{1}$$

где F_r — растягивающая нагрузка при достижении предела текучести, H; A_0 — начальное поперечное сечение образца, мм².

Как видно (рис. 8) при возрастании содержания шунгита в ПКМ показатель предела текучести увеличивается. Стоит отметить, чем выше

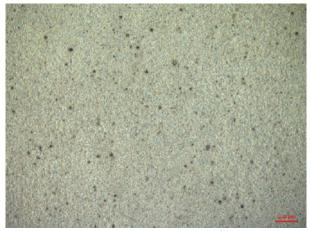


Рис. 7. Пленка с содержанием 4 % шунгита после облучения, 200 нм

предел текучести, тем больше нагрузки материал может выдержать. Таким образом, введение $40\,\%$ шунгита обеспечивает ПКМ наибольшую стойкость к нагрузкам, но на переработку данного композита потребуется больше энергозатрат, следовательно, оптимальное содержание шунгита $-10\,\%$.

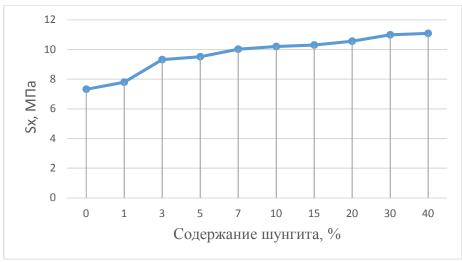


Рис. 8. Зависимость предела текучести от содержания шунгита в ПКМ.

Выводы. Проанализировав результаты проведенных исследований можно сделать вывод, что введение шунгита в полимерную матрицу позволяет придать более высокие эксплуатационные свойства композиционному материалу. Разработанный материал является фотоустойчивым и бактерицидным, что позволяет успешно использовать его в качестве упаковки для пищевой промышленности. Следует отметить, что для производства полимерного композиционного материала на основе ПЭНД и шунгита не требуется дополнительное оборудование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Комова Н.Н., Потапов Е.Э., Прут Э.В., Солодилов В.И., Ковалева А.Н. Экспресс-метод оценки активности шунгитового наполнителя в эластомерных композиционных материалах // Каучук и резина. 2017. №2. Т. 77. С. 92–96.
- 2. Klyuchnikova N.V., Sokolenko I.V., Evtushenko E. Influenceof Metal Componenton Cakingof Metal-Ceramic Composites Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2014. № 5(5). P. 1637

- 3. Ключникова Н.В., Пискарева А.О. Получение полимерного воска из отходов производств полиэтиленовых труб // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 106–109.
- 4. Ключникова Н.В., Гордеев С.А., Гордиенко М.Д. Полимерный композиционный материал на основе термопластичного полиимида. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 126–129
- 5. Осипов П.О. Проблемы утилизации и переработки полимеров. СПб.: Pakkermash, 2008. 53 с.
- 6. Генов И., Мухачева В.Д., Ключникова Н.В., Пискарева А.О. Защитные покрытия на основе модифицированных фенолформальдегидных композитов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 12. С. 91–97
- 7. Генов И., Кудина А.Е., Ключникова Н.В. Полимерное поверхностно-активное вещество для нефтедобывающей отрасли. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 99–104
- 8. Ковалевский, В. В. Шунгитовые породы перспективы и проблемы использования в композиционных материалах. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. В. В. Ковалевский. М.: 21 век, 2001. 303 с.
- 9. Zhang, H The effect of inorganic filler on charging properties of low density polyethylene / H. Zhang, Q. Yang, W. Wang Et al. Proc. of 9th Int. Symp. on Electrets. Shanghai, China, 1996. Pp. 323–328.
- 10. Прохорова С.Н., Потапов Е.Э., Иорданский Ф.П., Иванов В.В., Пятов И.С. Исследование процессов водунабуханияпакерных резин // Каучук и резина, 2018. №1. Т.77. С. 30–34
- 11. Хачатуров А.А., Потапов Е.Э., Колесов В.В., Фионов А.С., Бобров А.П., Смаль В.А., Прут Э.В., Шевченко В.Г., Тикунова И.В. Изучение электрофизических и акустических свойств полимерных композиционных материалов на основе СКЭПТ и шунгита // Каучук и резина, 2018. №2 Т. 77. С. 96–101.
- 12. Сорокина О.В., Потапов Е.Э., Резниченко С.В., Бобров А.П., Смаль В.А., Ядыкина В.В., Тикунова И.В.Исследование свойств высоконаполненных композитов на основе битума и

- шунгита (карелита) // Каучук и резина. 2018. №2. Т. 77. С. 92–96.
- 13. Чан ХыуТхань, Рахматулина А.П., Хусаинов А.Р., Потапов Е.Э. Модификация резин на основе СКИ некаучуковыми компонентами, содержащихся в серуме латекса НК. Науч.-техн. Сборник // Промышленное производство и использование эластомеров. 2017. Т. 3-4. С. 33–38.
- 14. Потапов Е.Э., Сорокина О.В., Шелухина А.А. и др.Изучение влияния шунгита (Карелита) на свойства полимер-битумных композитов. Тез.докл. конф. «Каучук и резина –2018: традиции и новации» (Москва, 2018). С. 86.
- 15. Прут Э.В., Жорина Л.А., Кузнецова О.П., Колотилин Д.В., Крашенников В.Г., Сергеев А.И., Ермилов В.В., Потапов Е.Э., Волик В.Г. Композиты на основе полиэтилена и гидролизата кератина // Химическая физика. 2018. Т. 37. №4. С. 91–99.
- 16. Хачатуров А.А., Потапов Е.Э., Фионов А.С., Колесов В.В., Прут Э.В. Функциональные эластомерные материалы на основе бутадиенстирольных каучуков и магнетита. Материалы докладов VIIIВсероссийской конференции «Каучук и резина 2018: традиции и новации», 25-26 апреля, Москва, Экспоцентр, 64 с.
- 17. Комова Н.Н., Потапов Е.Э., Эрастов И.К. Электрофизические свойства полихлоропрена, наполненного шунгитом. Материалы докладов VIII Всероссийской конференции «Каучук и резина 2018: традиции и новации», 25-26 апреля, Москва, Экспоцентр, 75 с.
- 18. Чан ХыуТхань, А.П. Рахматуллина, В.Е. Проскурина, Ю.Г. Галяметдинов, Е.Э. Потапов. Модификация синтетического изопренового каучука белково-липидными комплексами. Материалы докладов VIII Всероссийской конференции «Каучук и резина 2018: традиции и новации», 25-26 апреля, Москва, Экспоцентр, 71 с.
- 19. Ханин М.В. Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов. М.В. Ханин, Г.П. Зайцев. М.: Химия, 2009. 256 с.
- 20. Bobrov A.P., Kablov W.F., Smail V.A. Study of the abrasive activity of natural carbon-containing mineral Compound ingredients of Polymer composites.Interm. Polym. Sci. and Technol 2015. Vol. 42, №9. Pp. 68–71.

Информация об авторах

Ключникова Наталья Валентиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии E-mail: 4494.55@vail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Генов Иван, директор Фонда науки и образования. Болгария, г. Бургас , ул. Оборище, 21. E-mail: office@sciencebg.net

Урванов Кирилл Андреевич, студент 4 курса кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: zerstoren575@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Пискарева Анастасия Олеговна, студент 1 курса магистратуры кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: a.burdasova@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гордеев Семен Александрович, студент 4 курса кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: lie_to_me_house@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в октябре 2019 г.

© Ключникова Н.В., Пискарева А.О., Урванов К.А., Гордеев С.А., Генов И., 2020

¹,*Klyuchnikova N.V, ¹ Piskareva O.A., ¹Urvanov K.A., ¹Gordeev S.A., ²Genov I.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova ²Foundation for Science and Education Bulgaria *E-mail: 4494.55@mail.ru

INFLUENCE OF SHUNGITE ON PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL

Abstract. Polymers are increasingly replacing conventional materials such as wood, metals, natural fibers. This is due to a number of advantages of polymer materials over classic ones: increased chemical resistance to aggressive environments, high strength indicators and durability in the operation of products. In addition, polymeric materials are actively used in the food industry.

The use of polymer packaging is reaching global proportions. Improving production technologies and formulations allows to create new polymer composites with improved properties, which gives the rapid growth of the polymer industry.

In order to impart the necessary properties, fillers are introduced into the polymeric material. By introducing such additives into the polymer, it is possible to control the properties of the material obtained, for example, viscosity, density, transparency, bactericidal and other important properties.

The article considers the influence of shungite on the operational properties of the finished composite based on low-pressure polyethylene.

The research results showed that the composite obtained provides the highest characteristics with respect to light reflection and absorption for all wavelength regions that are important during operation, has bactericidal properties, and it has been proved that in the shungite-filled polymer, a shift in the temperature of the onset of thermal degradation towards higher temperatures is observed. The composite acquires higher operational and physico-mechanical properties.

Keywords: polymer composite material (PCM), polymer, low-pressure polyethylene, shungite.

REFERENCES

- 1. Komova N.N., Potapov E.E., Prut E.V., Solodilov V.I., Kovaleva A.N.Express method for evaluating the activity of schungite filler in elastomeric composite materials [Ekspress-metod ocenki aktivnosti shungitovogo napolnitelya v elastomernyh kompozicionnyh materialah]. Rubber and Rubber. 2017. No. 2. Vol. 77. Pp. 92–96. (rus)
- 2. Klyuchnikova N.V., Sokolenko I.V., Evtushenko E. Influence of Metal Component on Caking of Metal-Ceramic Composites Research Journal of Pharmaceutical // Biological and Chemical Sciences. 2014. No. 5 (5). P. 1637
- 3. Klyuchnikova N.V., Piskareva A.O. Obtaining polymer wax from waste products of polyethylene pipes [Poluchenie polimernogo voska iz

- othodov proizvodstv polietilenovyh trub]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 11. Pp. 106–109. (rus)
- 4. Klyuchnikova N.V., Gordeev S.A., Gordienko M.D. Polymer composite material based on thermoplastic polyimide [Polimernyj kompozicionnyj material na osnove termoplastichnogo poliimida]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 12. Pp. 126–129 (rus)
- 5. Osipov P.O. Problems of utilization and processing of polymers [Problemy utilizacii i pererabotki polimerov]. P.O. Osipov. St. Petersburg: Pakkermash, 2008.53 p.(rus)
- 6. Genov I., Mukhacheva V.D., Klyuchnikova N.V., Piskareva A.O. Protective coatings based on

modified phenol-formaldehyde composites [Zashchitnye pokrytiya na osnove modificirovannyh fenolformal'degidnyh kompozitov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 12. Pp. 91–97. (rus)

- 7. Genov I., Kudina A.E., Klyuchnikova N.V. Polymer surfactant for the oil industry [Polimernoe poverhnostno-aktivnoe veshchestvo dlya neftedobyvayushchej otrasli]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 11. Pp. 99–104(rus)
- 8. Kovalevsky V.V .Shungite rocks prospects and problems of use in composite materials. Theory and practice of manufacturing technologies for products from composite materials and new metal alloys [SHungitovye porody perspektivy i problemy ispol'zovaniya v kompozicionnyh materialah. Teoriya i praktika tekhnologij proizvodstva izdelij iz kompozicionnyh materialov i novyh metallicheskih splavov]. M.: 21 century, 2001. 330 p. (rus)
- 9. Zhang H., Yang Q., Wang W. Et al. The effect of inorganic filler on charging properties of low density polyethylene. Proc. of 9th Int. Symp on Electrets. Shanghai, China, 1996. Pp. 323–328.
- 10.Prokhorova S.N., Potapov E.E., Jordan F.P., Ivanov V.V., Pyatov I.S. Investigation of the processes of water swelling of packer rubbers [Issledovanie processov vodunabuhaniya pakernyh rezin]. Rubber and Rubber. 2018. No. 1. Vol. 77. Pp. 30–34. (rus)
- 11.Khachaturov A.A., Potapov E.E., Kolesov V.V., Fionov A.S., Bobrov A.P., Smal V.A., Prut E.V., Shevchenko V.G., Tikunova I.V. Study of the electrophysical and acoustic properties of polymer composite materials based on SKEPT and schungite [Izuchenie elektrofizicheskih i akusticheskih svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov na osnove SKEPT i shungita]. Rubber and rubber. 2018. No. 2 Vol. 77. Pp. 96–101.(rus)
- 12.Sorokina O.V., Potapov E.E., Reznichenko S.V., Bobrov A.P., Smal V.A., Yadykina V.V., Tikunova I.V. Investigation of the properties of highly filled composites based on bitumen and shungite (Karelite) [Issledovanie svojstv vysokonapolnennyh kompozitov na osnove bituma i shungita (karelita)]. Rubber and rubber. 2018. No. 2. Vol. 77. Pp. 92–96. (rus)
- 13.Chan Huu Than, Rakhmatulin A.P., Khusainov A.R., Potapov E.E. Modification of rubber based on SKI with non-rubber components contained in NK latex serum [Modifikaciya rezin na osnove SKI nekauchukovymi komponentami, soderzhash-

- chihsya v serume lateksa NK]. Scientific and technical The collection "Industrial production and use of elastomers". 2017. Vol. 3-4. Pp. 33–38. (rus)
- 14.Potapov E.E, Sorokina O.V., Shelukhina A.A. et al. Study of the influence of shungite (Karelite) on the properties of polymer-bitumen composites[Izuchenie vliyaniya shungita (Karelita) na svojstva polimer-bitumnyh kompozitov]. Thesis Doc. conf. "Rubber and Rubber –2018: Traditions and Innovations" (Moscow, 2018). 86 p.(rus)
- 15.Prut E.V., Zhorina L.A., Kuznetsova O.P., Kolotilin D.V., Krashennikov V.G., Sergeev A.I., Ermilov V.V., Potapov E.E., Wolf V.G. Composites based on polyethylene and keratin hydrolysate [Kompozity na osnove polietilena i gidrolizata keratina]. Chemical physics. 2018. Vol. 37, No. 4. Pp. 91–99. (rus)
- 16.Khachaturov A.A., Potapov E.E., Fionov A.S., Kolesov V.V., Prut E.V. Functional elastomeric materials based on styrene butadiene rubbers and magnetite [Funkcional'nye elastomernye materialy na osnove butadien-stirol'nyh kauchukov i magnetite]. Proceedings of the VIII All-Russian Conference "Rubber and Rubber 2018: Traditions and Innovations", April 25-26, Moscow, Expocenter, 64 p. (rus)
- 17.Komova N.N., Potapov E.E., Erastov I.K. Electrophysical properties of polychloroprene filled with schungite [Elektrofizicheskie svojstva polihloroprena, napolnennogo shungitom]. Proceedings of the VIII All-Russian Conference "Rubber and Rubber 2018: Traditions and Innovations", April 25-26, Moscow, Expocenter, 75 p. (rus)
- 18.Chan Huu Than, A.P. Rakhmatullina, V.E. Proskurina, Yu.G. Galyametdinov, E.E. Potapov. Modification of synthetic isoprene rubber with protein-lipid complexes [Modifikaciya sinteticheskogo izoprenovogo kauchuka belkovo-lipidnymi kompleksami]. Proceedings of the VIII All-Russian Conference "Rubber and Rubber 2018: Traditions and Innovations", April 25-26, Moscow, Expocenter, p. 71(rus)
- 19.Khanin M.V., Zaitsev G.P. Wear and destruction of polymer composite materials [Iznashivanie i razrushenie polimernyh kompozicionnyh materialov]. M.: Chemistry, 2009. 256 p.(rus)
- 20. Bobrov A.P., Kablov W.F., Smail V.A. Study of the abrasive activity of natural carbon-containing mineral Compound ingredients of Polymer composites. Interm. Polym. Sci. and Technol. 2015. Vol. 42, No. 9. Pp. 68–71.

Information about the authors

Klyuchnikova, Natalya V. PhD, Associate professor. E-mail: 4494.55@vail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Urvanov, **Kirill A.** Student.E-mail: zerstoren575@gmail.com Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Piskareva, Anastasia O. Student of the Department of Theoretical and Applied Chemistry E-mail: a.burdasova@in-box.ru Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, d. 46.

Gordeev, **Semyon A.** Student. E-mail: lie_to_me_house@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, d. 46.

Genov Ivan. Director. E-mail: office@sciencebg.net. Bulgaria, Bourgas, Str. Oborishche, 21.

Received in October 2019

Для цитирования:

Ключникова Н.В., Пискарева А.О., Урванов К.А., Гордеев С.А., Генов И. Влияние шунгита на эксплуатационные свойства полимерного композиционного материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 96–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-96-105

For citation:

Klyuchnikova N.V, Piskareva O.A., Urvanov K.A., Gordeev S.A., Genov I. Influence of shungite on performance properties of polymeric composite material. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 96–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-96-105

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-106-114

^{1,}*Бондаренко Н.И., ¹Пучка О.В., ²Бессмертный В.С., ³Чуев С.А., ¹Изотова И.А., ⁴Брагина Л.Л., ¹Яловенко Т.А.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
²Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
³Белгородский университет кооперации, экономики и права
⁴Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
*E-mail: bondarenko-71@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕ-СКИХ ОБЛИЦОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕШАННОГО СТЕКЛОБОЯ

Аннотация. Разработана эффективная энергосберегающая технология получения композиционных стеклокристаллических облицовочных материалов на основе фракционированного боя листовых и тарных стекол, боя фарфора и натриевого жидкого стекла. Обосновано использование в составах композиционных стеклокристаллических облицовочных материалов тонкодисперсного порошка фарфора в количестве до 10 мас. % и жидкого натриевого стекла до 5 мас. %. Показано, что оптимальный фракционный состав гранулированного смешанного стеклобоя составляет 35 мас. % фракции 0,63-0,80 мм; 35 мас. %- фракции 0,80-1,25 мм и 30 мас. % фракции 1,25-3,15 мм. Рассчитаны политермы вязкости бесцветного, зеленого и коричневого тарных стекол, а также листового стекла, на основе полученных зависимостей показана возможность использования смешанного стеклобоя для получения композиционных стеклокристаллических облицовочных материалов. С использованием рентгенофлуоресцентного анализа исследован химический состав листовых и тарных стёкол, фарфора. Разработаны оптимальные составы шихт, позволяющие получить стеклокристаллические материалы с прочностью на сжатие до 79 МПа. Технология получения композиционного стеклокристаллического облицовочного материала включает следующие технологические операции: измельчение боя стекла; измельчение боя фарфора; сушка жидкого натриевого стекла; рассев измельчённого боя стекла на фракции; помол измельчённого боя фарфора; помол высушенного жидкого натриевого стекла; отвешивание компонентов в соответствии с разработанными составами; усреднение фракционированного боя стекла с тонкоизмельчённым фарфором; усреднение смеси с тонкоизмельченным высушенным жидким натриевым стеклом; укладка смеси в металлические формы; уплотнение смеси в металлических формах; термическая обработка в муфельной печи (спекание); извлечение облицовочной плитки из форм; обрезка краев плитки алмазной пилой; контроль качества готовых изделий.

Ключевые слова: смешанный стеклобой, бой фарфора, натриевое жидкое стекло, спекание, политермы вязкости, прочность на сжатие.

Введение. В настоящее время строительная индустрия РФ требует эффективных, конкурентоспособных стеновых и облицовочных материалов [1]. Однако, использование дефицитных сырьевых материалов значительно удорожает себестоимость материалов, а в конечном итоге и стоимость 1 м² жилья [2]. Основными направлениями получение конкурентоспособной продукции являются снижение энергозатрат, частичная или полная замена дефицитных материалов местными источниками сырья и различными отходами промышленности [3–5].

Достаточно высокоэффективным сырьевым материалом может служить бой стеклянных бытовых отходов и бой различных керамических производств [6–8]. Однако, проблема сбора и переработки стеклянных бытовых отходов в РФ до настоящего времени не решена и связана с принятием в 2012 году Технического регламента Та-

моженного Союза, запрещающего вторичное использование различных видов тары, в том числе и стеклотары [9–11].

Тенденции сбора, переработки, использования и утилизации различных видов стеклянных отходов подробно освящены в многочисленных работах отечественных и зарубежных авторов [12–14]. Основным направлением переработки и утилизации стеклобоя является их использование в технологиях по производству стеновых, облицовочных, отделочных, теплоизоляционных материалов [15–17].

Различные виды цветных тарных стекол могут с успехом использоваться для получения защитно-декоративных покрытий на композиционных материалах, бетонах, силикатных материалах автоклавного твердения, керамике и стеклах [18–20]. Однако до настоящего времени в РФ не решена проблема использования смешанного

стеклобоя, а также боя различных видов керамики для получения эффективных композиционных стеклокристаллических материалов.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовали бой стеклянных бытовых отходов, который был представлен зелёным, коричневым, бесцветным тарными листовым стеклами. В качестве упрочняющей добавки использовали бой твёрдого фарфора. В качестве добавки, снижающей температуру обжига, использовали натриевое жидкое стекло.

Химический состав используемых в работе стёкол и твердого фарфора исследовали рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре APL9900 «Thermoscientific».

Обоснование выбора боя твёрдого фарфора в качестве компонента в стеклокристаллическом облицовочном материале заключается в следующем. Во-первых, бой твёрдого фарфора предложено вводить в состав в качестве упрочняющего компонента, способного образовать в проектируемом стеклокристаллическом материале достаточно прочный пространственный каркас. Вовторых, муллит в твёрдом фарфоре обеспечивает высокую прочность на сжатие и изгиб, повышенную микротвёрдость и химическую устойчивость композиционного облицовочного материала. В-третьих, бой твёрдого фарфора существенно повысит термические свойства композиционного облицовочного материала.

Повышение эксплуатационных характеристик связано с тем, что сам твёрдый фарфор имеет относительную высокую плотность (2,4—2,5 г/см³), высокую прочность на сжатие (350—370 МПа), изгиб (60—140 МПа) и растяжение (15—60 МПа). Его термический коэффициент линейного расширения лежит в пределах (3,8—6,7)·10-6 К-1, а удельная теплоёмкость составляет 0,2—0,3 Дж/(кг·К). В твердом фарфоре содержится в среднем 55 % стеклофазы, а кристаллическая фаза представлена муллитом, кварцем и кристобалитом.

Бой цветного стекла тары и листовых стёкол подвергали измельчению в лабораторной щековой дробилке. После дробления измельченное стекло с использованием стандартного набора сит фракционировали. Крупные частицы стеклобоя размером более 3,15 мм подвергали повторному измельчению и последующему рассеву. Для получения композиционного стеклокристаллического облицовочного материала использовали фракции размером 0,63–0,80 мм, 0,80–1,25 мм, 1,25–3,15 мм.

Бой фарфоровых изделий на первом этапе также подвергали грубому измельчению в лабораторной щековой дробилке, а затем тонкому помолу в лабораторной шаровой мельнице объёмом

10 л. В качестве мелющих тел в шаровой мельнице использовали уралитовые шары. Помол производили в течение двух часов.

После подготовки фракционированного стеклобоя и тонкоизмельчённого фарфора компоненты взвешивали на лабораторных технических весах и усредняли лопастным смесителем. В состав композиционного стеклокристаллического материала с целью снижения температуры спекания вводилось натриевое жидкое стекло.

Как показали предварительные эксперименты, ввод жидкого стекла в подготовленную смесь способствовал образованию крупных отдельных комков, что не позволило усреднить жидкое натриевое стекло по всему объёму. Для равномерного его распределения в механическую смесь фракционированного стеклобоя и тонкоизмельченного фарфора вводили термообработанное и дегидратированное жидкое стекло. Термообработку жидкого стекла производили в сушильном шкафу при температуре 105 °C в течение одного часа. Затем высушенное жидкое стекло подвергали тонкому помолу в шаровой фарфоровой мельнице объёмом 6 л в течение 30 мин. Тонкоизмельченное жидкое стекло добавляли в смесь боя стекла и фарфора и смешивали в лабораторном лопастном смесителе в течение 15 мин. Полученную смесь укладывали в металлические формы размером 50×50 мм и уплотняли. Заполненные металлические формы помещали в муфельную печь для спекания при температурах 675-750 °C. Для исследования показателей качества края плиток обрезались алмазной пилой.

В процессе исследований была разработана типовая номенклатура потребительских свойств разработанного облицовочного материала. Номенклатура показателей качества и свойств композиционного стеклокристаллического облицовочного материала представлена в таблице 1.

Разработанная номенклатура является основой для оценки конкурентоспособности композиционного стеклокристаллического облицовочного материала.

Основная часть. Для обоснования выбора смешанного стеклобоя из наиболее распространённых в РФ видов стеклянных бытовых отходов были рассчитаны по известным методикам политермы вязкости в интервале температур 600–900 °C (рис. 1).

Анализ полученных зависимостей позволяет заключить, что политермы вязкости $lg\eta = f(T)$ используемых в работе стекол практически совпадают. Это в свою очередь позволило прогнозировать образование прочного пространственного каркаса при спекании гранул смешанного стеклобоя.

Как показали исследования, содержание оксидов в тарных и листовых стеклах удовлетворило ГОСТ 111–2014 (табл. 2).

С целью снижения температуры спекания в исследовании использовалось натриевое жидкое стекло плотностью $1,45\,\,\mathrm{r/cm^3}$ и силикатным модулем 2,7.

Таблица 1 Номенклатура показателей качества и свойств композиционного стеклокристаллического облицовочного материала

Объект исследования	Размерность показателя качества	Показатели качества
Композиционный стеклокри-	МПа	Прочность на сжатие
сталлический облицовочный	МПа	Прочность на изгиб
материал	МПа	Микротвёрдость
	ΔT, °C	Термостойкость
	Гидролитический класс	Водостойкость
	Γ/cm^3	Плотность
	%	Кислотостойкость
	%	Щелочестойкость
	%	Водопоглощение
	%	Пористость
	циклы	Морозостойкость

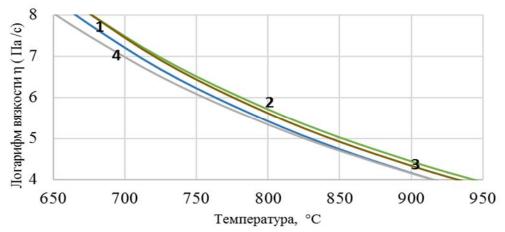


Рис.1. Политермы вязкости стекол смешанного стеклобоя: I — листовое стекло; 2 — тарное зеленое стекло; 3 — тарное коричневое стекло; 4 — тарное бесцветное стекло

Химический состав стекол и твердого фарфора

Таблица 2

№	Цанизанованна	Химический состав, мас. %							
п/п	Наименование	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO_3	Na ₂ O	K ₂ O
1	Листовое стекло	75,5	1,7	8,6	3,3	0,1	0,3	13,6	_
2	Тарное зеленоестекло	71,0	2,5	7,4	3,2	1,5	0,4	14,6	_
3	Тарное коричневое стекло	71,4	2,3	8,9	3,0	0,5	0,3	14,2	_
4	Тарное бесцветное стекло	72,0	2,5	7,3	3,6	0,1	0,3	14,0	_
5	Твердый фарфор	68,1	25,9		_	0,02		0,2	5,8

Для прогнозирования составов смешанные стекла и твердый фарфор измельчали и рассевали на ситах. После рассева на фракции разработанные составы после взвешивания на аналитических весах усредняли в лабораторном смесителе, увлажняли жидким стеклом и спекали в муфельной печи.

Состав фракций гранулированного стекла и их соотношение в исходных шихтах представлен в таблице 3.

Разработанные составы помещали в муфельную печь и обжигали при температурах 675 °C, 700 °C, 715 °C, 725 °C, 735 °C и 750 °C. Наилучшие результаты были получены при температуре 725 °C.

После термообработки исследовали эксплуатационные характеристики облицовочных стеклокристаллических материалов (табл. 4).

Таблица 3

Шифр	Содерж	Haar trivag Magaa 187/18 ³		
состава	0,63-0,8 мм	0,8-1,25 мм	1,25-3,15 мм	Насыпная масса, кг/м ³
1	40	40	20	1438
2	35	45	20	1421
3	30	50	20	1381
4	30	40	30	1356
5	35	35	30	1419
6	40	30	30	1426
7	25	35	40	1433
8	30	30	40	1345
9	35	25	40	1365

Таблица 4 Разработанные составы стеклокристаллического облицовочного материала и их свойства при температуре обжига 725 °C

Шифр состав	Содержание порошка фарфора, мас. %	Содержание жидкого стекла, мас. %	Прочность на сжа- тие, МПа	Пористость, %
1	5	2,5	20	28,1
1	10	5,0	32	27,0
2	5	2,5	24	27,3
2	10	5,0	46	25,8
3	5	2,5	28	26,5
3	10	5,0	62	20,3
4	5	2,5	38	26,9
4	10	5,0	58	21,9
5	5	2,5	42	26,3
5*	10*	5,0*	79*	16,9*
6	5	2,5	62	19,3
6	10	5,0	68	18,7
7	5	2,5	53	23,8
7	10	5,0	63	19,1
8	5	2,5	48	25,1
8	10	5,0	65	18,9
9	5	2,5	36	19,0
9	10	5,0	56	22,7

^{* -} оптимальный состав

Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что оптимальные составы включают до 10 % тонкодисперсного твёрдого фарфора и до 5 % натриевого жидкого стекла.

Разработанная технология получения композиционного стеклокристаллического облицовочного материала представлена на рисунке 2.

Выводы. Разработана энергосберегающая технология получения стеклокристаллического облицовочного материала на основе боя листового и тарного стекол, боя фарфора и натриевого жидкого стекла. Показано, что оптимальный фракционный состав смешанного боя листового

стекла, бесцветной, зеленой и коричневой стеклотары составляет 35 мас. % фракции 0,63–0,8 мм; 35 мас. % фракции 0,8–1,25 мм и 30 мас. % фракции 1,25–3,15 мм. Установлено, что композит с оптимальным фракционным составом смешанного стеклобоя, включающий тонкодисперсный фарфор 10 мас. % и жидкое натриевое стекло–5 мас. %, позволяет снизить температуру обжига с 750 до 725 °C. Разработанный стеклокристаллический облицовочный материал оптимального состава обладал высокими эксплуатационными свойствами, в частности, прочностью на сжатие 79 МПа.



Рис. 2. Технология получения композиционного стеклокристаллического облицовочного материала

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Бондаренко Д.О., Строкова В.В., Тимошенко Т.И., Роздольская И.В. Плазмохимическое модифицирование облицовочного композиционного материала на основе полых стеклянных микросфер с защитно-декоративным покрытием // Перспективные материалы. 2018. № 8. С. 72— 80.
- 2. Онищук В.И., Жерновая Н.Ф., Дороганов Е.А. Мозаичная смальта для строительства // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 13–15.
- 3. Яценко Е.А., Смолий В.А., Гольцман Б.М., Косарев А.С. Исследование макро- и микроструктуры пеностекол на основе шлаковых отходов ТЭС // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2012. № 6. С. 127–130.
- 4. Смолий В.А., Яценко Е.А., Косарев А.С., Гольцман Б.М. Разработка составов и технологический параметров синтеза ячеистых теплоизоляционных строительных стекломатериалов с заданной плотностью // Стекло и керамика. 2016. \mathbb{N} 6. С. 22–25.
- 5. Bondarenko D.O., Strokova V.V. Operating properties of the coating, depending on the composition during plasma-chemical modification// IOP

- Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 341. Articlenumber 012141.
- 6. Павлушкина Т.К., Кисиленко Н.Г. Использование стекольного боя в производстве строительных материалов // Стекло и керамика. 2011. № 5. С. 27–34.
- 7. Lesovik V.S., Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Larsen O.A., Puchka O.V., Vaysera S.S. Approach on improving the performance of thermal insulating and acoustic glass composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Articlenumber 042030.
- 8. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E., Tarasova E.E. Control of the structure of porous glass-ceramic material // Glass and Ceramics. 2017. Vol. 74. Issue 3–4. Pp. 95–98.
- 9. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S., Zhernovaya N.F., Tarasova E.E.Shrink-free face material based on cullet and colemanite // Glass and Ceramics. 2016. Vol. 73. Issue 3–4. P. 103–106.
- 10.Yatsenko E.A., Smolii V.A., Kosarev A.S., Dzyuba E.B., Grushko I.S., Gol'Tsman B.M. Physical-chemical properties and structure of foamed slag glass based on thermal power plant wastes // Glass and Ceramics. 2013. Vol. 70. Issue 1–2. Pp. 3–6.

11. Yatsenko E.A., Zubekhin A.P., Smolii V.A., Grushko I.S., Kosarev A.S., Gol'tsman B.M. Resource-conserving technology of heat-insulation-decorative glass-composite material based on ashslag wastes // Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. Issue 5–6. Pp. 216–219.

12. Болотин В.Н., Минько Н.И. Стеклобой. Вторая жизнь // Стекло мира. 1997. №4. С. 57–62.

13. Минько Н.И., Добринская О.А. Технологические особенности использования стеклобоя в производстве стекломатериалов // Техника и технология силикатов. 2019. Т. 26. № 1. С. 9–14.

14.Min'ko N.I., Dobrinskaya O.A., Bulgakov A.S.Technological features of using secondary products in the production of silicate materials // Glass Physics and Chemistry. 2018. Vol. 44. Issue 3. Pp. 238–243.

15.Лесовик В.С., Пучка О.В., Вайсера С.С., Елистраткин М.Ю. Новое поколение строительных композитов на основе пеностекла // Строительство и реконструкция. 2015. № 3 (59). С. 146–154.

16.Пучка О.В., Сергеев С.В., Вайсера С.С., Калашников Н.В. Высокоэффективные тепло-

изоляционные материалы на основе техногенного сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. N2 2. С. 51–55.

17.Минько Н.И., Губарев А.В., Губарева О.А. Окрашенные формы шлаков силикомарганцевого производства для изготовления стеклокристаллических материалов // Стекло и керамика. 2000. №7. С.8–10.

18.Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. Pp. 105–110.

19. Volokitin O., Volokitin G., Skripnikova N., Shekhovtsov V. Plasma technology for creation of protective and decorative coatings for building materials // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1698. Articlenumber 070022.

20.Пучка О.В., Минько Н.И., Степанова М.Н. Композиционный теплоизоляционный материал на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием по лицевой поверхности // Стекло и керамика. 2009. № 2. С. 3–5.

Информация об авторах

Бондаренко Надежда Ивановна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Пучка Олег Владимирович, кандидат технических наук, профессор кафедры стандартизации и управления качества. E-mail: oleg8a@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бессмертный Василий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии оборудования машиностроения и металлургии. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон Макаренко, д. 42.

Чуев Сергей Александрович, кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры технологии общественного питания и товароведения. E-mail: sprint@.ru. Белгородский университет кооперации, экономики и права. Адрес: Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, д. 116а.

Изотова Ираида Александровна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: iren.izotova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Брагина Людмила Лазаревна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей. E-mail: bragina_l@ukr.net. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Украина, 61002, Харьков, ул. Кирпичева, д. 2.

Яловенко Татьяна Андреевна, магистрант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: jalovencko@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в ноябре 2019 г.

©Бондараенко Н.И., Пучка О.В., Бессмертный В.С., Чуев С.А., Изотова И.А., Брагина Л.Л., Яловенко Т.А., 2020

^{1,*}Bondarenko N.I., ¹Puchka O.V., ²Bessmertnyi V.S., ³Chuev S.A., ¹Izotova I.A., ⁴Bragina L.L., ¹Yalovenko T.A.

¹State Technological University named after V.G. Shukhov
 ²Star Oskol Technological Institute. A.A. Ugarova (branch)
 National Research Technological University "MISiS"
 ³Belgorod University of Cooperation, Economics and Law
 ⁴National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

 * E-mail: bondarenko-71@mail.ru

TECHNOLOGY FOR PRODUCING COMPOSITE GLASS-CRYSTAL FACING MATERIALS BASED ON MIXED CULLET

Abstract. An effective energy-saving technology for producing composite glass-crystal facing materials based on fractionated cullet of sheet and container glasses, cullet of porcelain and sodium liquid glass has been developed. The use of fine porcelain powder in the composition of composite glass-crystal facing materials in an amount of up to 10 wt is justified. % and liquid sodium glass up to 5 wt. %. It is shown that the optimal fractional composition of granulated mixed cullet is 35 wt. % fraction 0.63-0.80 mm; 35 wt. % fractions of 0.80–1.25 mm and 30 wt. % fraction of 1.25–3.15 mm. Polytherms of viscosity of colorless, green and brown container glasses, as well as sheet glass, are calculated. The possibility of using mixed cullet for obtaining composite glass-crystal facing materials is on the basis of obtained dependencies. The chemical composition of sheet and container glasses and porcelain is studied using x-ray fluorescence analysis. Optimal charge compositions have been developed to obtain glass-crystal materials with compressive strength up to 79 MPa. The technology of obtaining composite glass-ceramic facing material includes the following technological operations: milling of glass breakage; grinding cullet of porcelain; drying of sodium liquid glass; the screening of crushed cullet on fractions; the grind of crushed cullet of China; grinding the dried sodium silicate glass; weighing the components in accordance with the developed formulations, the averaging of the graded cullet with fine porcelain; averaging the mixture of finely ground dried sodium silicate glass; stacking the mixture in a metal mold; compaction of the mixture in metal molds; heat treatment in a muffle furnace (sintering); extraction of facing tiles from molds; trimming the edges of the tiles with a diamond saw; quality control of finished products.

Keywords: mixed cullet, porcelain cullet, sodium liquid glass, sintering, polytherms of viscosity, compressive strength.

REFERENCES

- 1. Bondarenko D.O., Strokova V.V., Timoshenko T.I., Rozdol'skaya I.V. Plasma-chemical modification of facing composite material on the basis of hollow glass microspheres with protective and decorative coating Surface modification of corundum ceramics by argon ion beam [Plazmokhimicheskoye modifitsirovaniye oblitsovochnogo kompozitsionnogo materiala na osnove polykh steklyannykh mikrosfer s zashchitno-dekorativnym pokrytiyem]. Perspektivnye Materialy.2018. No. 8. Pp. 72–80. (rus)
- 2. Onishchuk V.I., Zhernovaya N.F., Doroganov E.A. Mosaic smalt for construction [Mozaichnaya smal'ta dly astroitel'stva]. Stroitel`nye Materialy. 2007. No. 8. Pp. 13–15. (rus)
- 3. Yatsenko E.A., Smoliy V.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S. Investigation of the macro- and microstructure of foamed glass on the basis of slag wastes from TES [Issledovaniye makro- i mikrostruktury penostekol na osnove shlakovykh othodov TES]. University News. North-Caucasian Region.Technical Sciences Series. 2012. No. 6. Pp. 127–130. (rus)

- 4. Smolii V.A., Yatsenko E.A., Kosarev A.S., Gol'tsman B.M. Development of compositions and technological parameters for the synthesis of cellular glass heat-insulation construction materials with prescribed density [Razrabotka sostavov i tekhnologicheskij parametrov sinteza yacheistyh teploizolyacionnyh stroitel'nyh steklomaterialov s zadannoj plotnost'yu]. Glass and Ceramics. 2016. No. 6. Pp. 22–25. (rus)
- 5. Bondarenko D.O., Strokova V.V. Operating properties of the coating, depending on the composition during plasma-chemical modification. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 341. Article number 012141.
- 6. Pavlushkina T.K., Kisilenko N.G. Using of the glass cut in the manufacture of building materials [Ispol'zovanie stekol'nogo boya v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. Glass and Ceramics. 2011. No. 5. Pp. 27–34. (rus)
- 7. Lesovik V.S., Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Larsen O.A., Puchka O.V., Vaysera S.S. Approach on improving the performance of thermal insulating and acoustic glass composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Articlenumber 042030.

- 8. Dorokhova E.S., Zhernovaya N.F., Bessmertnyi V.S., Zhernovoi F.E., Tarasova E.E. Control of the structure of porous glass-ceramic material. Glass and Ceramics. 2017. Vol. 74. Issue 3–4. Pp. 95–98.
- 9. Dorokhova E.S., Zhernovoi F.E., Izotova I.A., Bessmertnyi V.S., Zhernovaya N.F., Tarasova E.E. Shrink-free face material based on cullet and colemanite.Glass and Ceramics. 2016. Vol. 73. Issue 3–4. Pp. 103–106.
- 10. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Kosarev A.S., Dzyuba E.B., Grushko I.S., Gol'Tsman B.M. Physical-chemical properties and structure of foamed slag glass based on thermal power plant wastes. Glass and Ceramics. 2013. Vol. 70. Issue 1–2. P. 3–6.
- 11. Yatsenko E.A., Zubekhin A.P., Smolii V.A., Grushko I.S., Kosarev A.S., Gol'tsman B.M. Resource-conserving technology of heat-insulation-decorative glass-composite material based on ashslag wastes. Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. Issue 5–6. Pp. 216–219.
- 12. Bolotin V.N., Minko N.I. Cullet. Second Life [Steklobyy. Vtorayazhizn']. Glass world. 1997. No. 4. Pp. 57–62. (rus)
- 13. Min'ko N.I., Dobrinskaya O.A. Technological features of the use of glass in the manufacture of glass materials [Tekhnologicheskie osobennosti ispol'zovaniya stekloboya v proizvodstve steklomaterialov]. Techniqueandtechnologyofsilicates. 2019. Vol. 26.No. 1. Pp. 9–14. (rus)
- 14. Min'ko N.I., Dobrinskaya O.A., Bulgakov A.S.Technological features of using secondary products in the production of silicate materials. Glass Physics and Chemistry. 2018. Vol. 44. Issue 3. Pp. 238–243.

- 15. Lesovik V.S., Puchka O.V., Vajsera S.S., Elistratkin M.Yu. Building a new generation of composites on the basis of foamed glass [Novoe pokolenie stroitel'nyh kompozitov na osnove penostekla]. Building and Reconstruction.2015. No. 3 (59). Pp. 146–154. (rus)
- 16. Puchka O.V., Sergeev S.V., Vaysera S.S., Kalashnikov N.V. High-efficiency heat-insulation materials on basis of technogenic raw material [Vysokoeffektivnye teploizolyacionnye materialy na osnove tekhnogennogo syr'ya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 2. Pp. 51–55. (rus)
- 17. Min'ko N.I., Gubarev A.V., Gubareva O.A. Colored slags of silicate manganese production for manufacturing glass-ceramic materials [Okrashennye formy shlakov silikomargancevogo proizvodstva dlya izgotovleniya steklo-kristallicheskih materialov]. Glass and Ceramics.2000. No. 7. Pp. 8–10. (rus)
- 18. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S., Strokova V.V. Plasma-chemical modification of concrete. Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. P. 105–110.
- 19. Volokitin O., Volokitin G., Skripnikova N., Shekhovtsov V. Plasma technology for creation of protective and decorative coatings for building materials. AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1698. Article number 070022.
- 20. Puchka O.V., Min'Ko N.I., Stepanova M.N. Foam-glass based composite heat-insulating material with a protective-decorative coating on the front surface [Kompozicionnyj teploizolyacionnyj material na osnove penostekla s zashchitno-dekorativnym pokrytiem po licevoj poverhnosti]. Glass and Ceramics. 2009. No. 2. Pp. 3–5. (rus)

Information about the authors

Bondarenko, Nadezhda I. PhD, Associate professor. E-mail: bondarenko-71@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Puchka, Oleg V. PhD, Professor. E-mail: oleg8a@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Bessmertnyi, Vasilyi S. DSc, Professor. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarova (branch) "National University of Science and Technology "MISIS». Russia, 309516, Stary Oskol, Belgorod region, Makarenko microdistrict, 42.

Chuev, Sergey A. PhD, Senior lecturer. E-mail: sprint @ .ru. Belgorod University of Cooperation, Economics and Law. Russia, 308023, Belgorod, ul. Sadovaya, 116a.

Izotova, **Iraida A.** Postgraduate student. E-mail: iren.izotova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bragina, Lyudmila L. DSc, Professor. E-mail: bragina_l@ukr.net. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Ukraine, 61002, Kharkov, st. Kirpicheva, 2.

Yalovenko, Tatyana A. Master student. E-mail: jalovencko@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in November 2019

Для цитирования:

Бондаренко Н.И., Пучка О.В., Бессмертный В.С., Чуев С.А., Изотова И.А., Брагина Л.Л., Яловенко Т.А. Технология получения композиционных стеклокристаллических облицовочных материалов на основе смешанного стеклобоя // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 106-114. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-106-114

For citation:

Bondarenko N.I., Puchka O.V., Bessmertnyi V.S., Chuev S.A., Izotova I.A., Bragina L.L., Yalovenko T.A. Technology for producing composite glass-crystal facing materials based on mixed cullet. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 106–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-106-114

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-115-125

¹Дякин П.В., ¹Пивинский Ю.Е., ²Прохоренков Д.С., ^{2,*}Дороганов В.А. ¹ООО НВФ "Керамбет-Огнеупор"

²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова *E-mail: dva vadjik1975@mail.ru

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВКВС БОКСИТА КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА В СИСТЕМЕ Al₂O₃ – SiO₂ – SiC

Аннотация. Изучено влияние температуры и продолжительности термообработки образцов на основе высококонцентрированной керамической вяжущей суспензии (BKBC) композиционного состава (боксит + 11 % BДКС), а также с дополнительным содержанием 15 % карбида кремния на их фазовый состав, структуру и некоторые свойства. Показано, что наличие ВДКС и свободного SiO_2 в составе образцов на основе BKBC композиционного состава предопределяет его кристаллизацию с переходом в кристобалит ($T \ge 1100~$ °C) и далее его взаимодействие с высокодисперсными частицами Al_2O_3 с образованием вторичного муллита. Охарактеризовано влияние продолжительности термообработки на фазовый состав, а также показатели прочности, кажущейся плотности, роста, степени окисления SiC и предела прочности при изгибе образцов, содержащих 15~% SiC. Установлено, что минимальное значение пористости (2,7~%) отмечается при продолжительности термообработки 8~ часов. Такое падение пористости и незначительное снижение плотности обусловлено не только определенной степенью муллитизации или окисления SiC, но и образованием значительного объема закрытой пористости. С увеличением продолжительности процесса обжига до 60~и 120~часов показатели пористости существенно увеличиваются, а плотность — резко снижается.

Ключевые слова: боксит китайский, SiC, кварцевое стекло, муллит, кристобалит корунд, тиалит, муллитизация, фазовый состав, BKBC, BДКС (высокодисперсное кварцевое стекло).

Введение. Актуальность исследований в области создания и применения высокоглиноземистых огнеупоров на основе бокситового шамота обусловлена их широким применением в черной металлургии, цементной промышленности [1–7]. целью повышения термомеханических свойств, коррозионной стойкости в состав данных огнеупоров вводится карборунд - SiC [1, 5-10]. Особенностью огнеупорных материалов, содержащих SiC, является его окисление с переходом в SiO₂, что как правило приводит к снижению эксплуатационных свойств. В связи с этим значительное количество научных исследований посвящено изучению процессов окисления SiC в материале, влияния SiC на физико-механические свойства, структурные и фазовые изменения огнеупоров карборундового и высокоглиноземистого составов [1, 5–22].

Целью настоящих исследований является изучение фазового состава, структуры и некоторых свойств образцов в системах Al_2O_3 – SiO_2 и Al_2O_3 – SiO_2 –SiC (15 %) на основе ВКВС композиционного состава как матричной системы керамобетонов после их термообработки в интервале температур (1000 – 1400 °C и в туннельной печи).

Материалы и методы. Основные исследования были проведены на образцах, полученных на основе ВКВС бокситового шамота марки Rota-HD с содержанием 11 % высокодисперсного кварцевого стекла (ВДКС) (состав *I*) и с дополнительным содержанием 15 % полидисперсного

SiC c $d_m = 27.4$ MKM (coctab 2) [18–20]. BKBC сложного состава были получены посредством введения предварительно суспендированного порошка карбида кремния в базовую ВКВС боксита. Методом шликерного литья получены отливки – образцы размером 10×10×80 мм с исходной пористостью 16-18 %. Материал исходных образцов характеризовался следующим химическим составом, %: $Al_2O_3 - 80.82$; $SiO_2 - 13.58$; $TiO_2 - 2.9$; $Fe_2O_3 - 1.04$; MgO - 0.79; CaO - 0.24; $Na_2O + K_2O - 0.2$; ППП – 0.43. Для состава, содержащего 15 % SiC, вышеприведенные данные содержанию оксидов пропорционально уменьшаются. Фазовый состав исходного образца, %: корунд -72; муллит - 8; стеклофаза -15; тиалит – 2; рутил – 1; кристобалит – 1; соединения на основе железа – 1, состав с 15 % SiC, %: корунд -58; муллит -8; SiC -15; соединения на титана $(Al_2TiO_5,$ TiO_2) кристобалит – 1; стеклофа – 13; соединения на основе Fe (магнетит Fe₂O₄, гематит Fe₂O₃) -1,5.

Образцы подвергались обжигу в лабораторной печи в интервале температур 1000—1400 °C с итоговой выдержкой — 5 часов и в промышленной туннельной печи в ОАО "Динур" по режиму обжига динасовых изделий. Как это следует из рис. 1, в соответствии с этим режимом продолжительность пребывания образцов в области температур интенсивного окисления карбида кремния (1300—1400 °C) составляла 60 часов, часть образ-

цов подвергали повторному обжигу, при этом общее время в области $1300-1400~^{\circ}C-120$ часов [21].

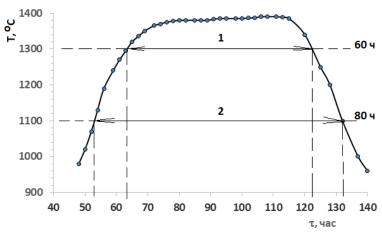


Рис. 1. Режим обжига образцов в туннельной печи:

1 – интервал температур 1300 – 1400 °C – 60 часов; 2 – интервал температур 1100 – 1400 °C – 80 часов

Рентгенодифракционный анализ проведен на дифрактометре «Дифрей-401». Исследования структуры образцов, обожженных при различных температурах, проведены в центре высоких технологий БГТУ им В.Г. Шухова при помощи

сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения "Tescan Mira 3" (Чехия). С помощью указанного микроскопа изучались сколы образцов, обожженных при температуре 1150 °С и туннельной печи, после их испытания на прочность при изгибе [24].

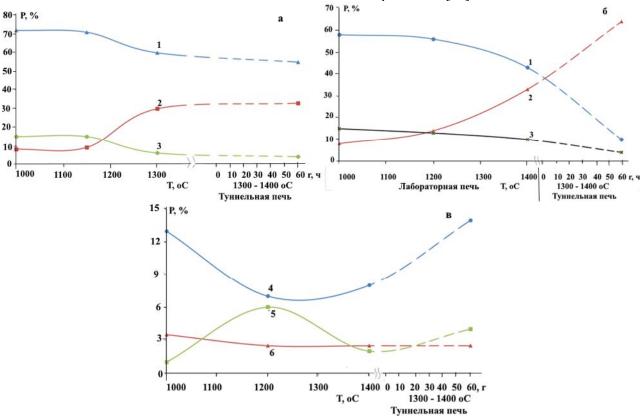


Рис. 2. Влияние температуры обжига в области 1000-1400 °C и длительной выдержки в туннельной печи (60 часов при 1300-1400 °C) на динамику фазовых превращений образцов на основе ВКВС композиционного состава в системе Al_2O_3 – SiO_2 (a), обозначения: 1 – корунд, 2 – муллит, 3 – стеклофаза и Al_2O_3 – SiO_2 – SiO_2 – SiO_2 –SiC (15 %) (б, в), обозначения: 1 – корунд; 2- муллит; 3 – SiC; 4 – стекло (аморфная фаза); 5 - кристобалит; 6 – соединения на основе титана (Al_2TiO_5 , TiO_2)

Фазовый состав и структура материалов. На рис. 2 представлено влияние температуры

обжига в области 1000–1400 °C и длительной выдержки в туннельной печи (60 часов при 1300–

1400 °C) на динамику фазовых превращений образцов на основе BKBC композиционного состава в системе Al_2O_3 – SiO_2 . (рис 2, a) и Al_2O_3 – SiO_2 –SiC (15 %) (рис 2, б, в) [20, 21].

На основе анализа данных, представленных на рис 2 (а, б, в) по влиянию температуры обжига на фазовые превращения в исследуемых образцах, установлена следующая зависимость: содержание корунда с повышением Тобж понижается (кривая 1) в 1,3 раза с 72 при 1000 °C до 55 % после $T_{\text{обж}}$ в туннельной печи для исходного состава и в 4,1 раза – с 58 при 1000 °С до 14 % после $T_{\text{обж}}$ в туннельной печи для состава с 15 % SiC. При этом количество муллита (кривая 2) при тех же условиях значительно возрастает более чем в 4 раза (до 33 %) для исходного состава и в 8 раз (до 64 %) для состава с 15 % SiC. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что главным и определяющим процессом в изменении минерального состава материала является синтез вторичного муллита [21, 24, 26–28]. Необходимо отметить, что повышение $T_{\text{обж}}$ (область 1000 - 1180 °C) сопровождается спеканием материала, что подтверждается усадкой на дилатометрической кривой, понижением открытой пористости и повышением прочности [20, 24]. Значительное влияние на спекание и микроструктуру материала оказывают содержащиеся в боксите соединения титана в виде тиалита Al₂TiO₅, рутила TiO₂ и гематита Fe_2O_3 (в боксите). В образцах уже после $T_{\text{обж}} =$ 1000 и 1150 °C отмечаются процессы окисления низших оксидов титана, образующиеся оксиды находятся в активной форме (эффект Хедвала) и в значительной степени входят в состав жидкой фазы, интенсифицирующей спекание и формирование структуры материала [24, 25, 28]. Наличие

в составе ВДКС и свободного SiO_2 в составе боксита предопределяет его кристаллизацию с переходом в кристобалит (> 1100 °C, рис 2 в, кривая 5) и далее его дальнейшее взаимодействие с высокодисперсными частицами Al_2O_3 с образованием вторичного муллита [24, 26–28]. Необходимо отметить, что количество кристобалита после обжига в туннельной печи для исходного образца и с 15 % SiC составляет - 4 % (рис 2 в, кривая 5).

Количество стеклофазы для исходных образцов с повышением Тобж понижается до 4 % (рис. 2 а, кривая 3), большая ее часть переходит в кристобалит [24]. В образцах с 15 % SiC в связи с активным окислением SiC после обжига в туннельной печи количество стеклофазы увеличивается до 14 % (рис 2 в, кривая 4). Из данных, представленных на рис 2 (кривая 6) по изменению титансодержащих соединений установлено понижение их значений с 3,5 % после обжига при 1000 °С до 2,5% при $T_{\text{обж}}$ – 1200, 1400 °С и туннельной печи. Этот факт объясняется тем, что при высоких температурах в связи с окислением Ti^{3+} —> Ti^{4+} твердый раствор (Al,Ti)₂O₃ распадается на Al₂O₃ и TiO₂ [24, 25, 28]. Содержание оксидов железа в виде магнетита – Fe₂O₄ и гематита Fe₂O₃ в материале образцов при всех температурах обжига находятся в пределах – 1–1,5 %. Из выше изложенного следует, что исходный состав после обжига в туннельной печи в сопоставлении с Т_{обж} 1000 °С остается корундомуллитовым, состав с 15 % SiC из корундомуллитового при тех же условиях перерождается в преимущественно муллитовый (муллит -64, корунд -10%).

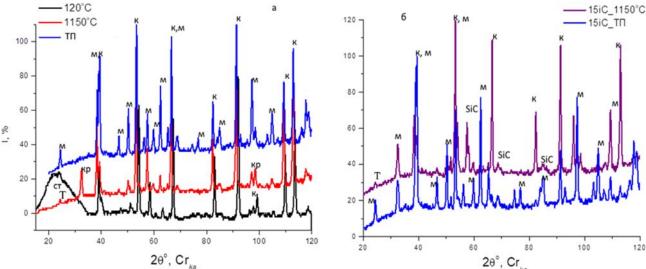
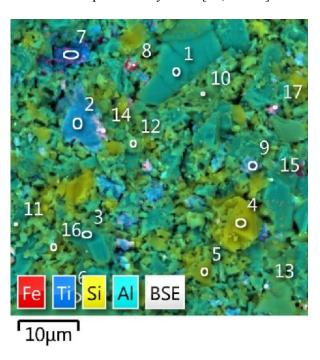


Рис 3 Рентгенограммы образцов на основе ВКВС композиционного состава в системе Al_2O_3 – SiO_2 , (а, исходный состав) и Al_2O_3 – SiO_2 –SiC (15 %) (б) после обжига при 1150 °C и туннельной печи (ТП), обозначения: к - корунд (Al_2O_3); м – муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$); т – тиаллит (Al_2TiO_5); кр – кристобалит (SiO_2); ст – стекло (Исследования проведены совместно с к. г-м. н. Л.А. Пьянковой)

На рис. 3 приведены рентгенограммы* образцов на основе ВКВС композиционного состава в системе $Al_2O_3-SiO_2$, (рис. 3, a) и $Al_2O_3 SiO_2$ –SiC (15 %) (рис. 3, б) после обжига при 1150 °С и туннельной печи (ТП). Из рис. 3 следует, что фазовый образцов на основе ВКВС композиционного состава в системе Al₂O₃-SiO₂, (a) и Al_2O_3 -SiO₂ -SiC (15 %) (б) представлен в основном корундом и муллитом, SiC., при этом определяется также тиалит и аморфная фаза. Сопоставление рентгенограмм исходного образца после сушки при 120 °C и обжига при температуре 1150 °C (а) показало, что находящееся в составе образца высокодисперсное кварцевое стекло (ВДКС) и свободный кремнезем частично претерпевают преобразование с переходом в кристобалит, часть SiO₂ взаимодействует с Al₂O₂ с образованием вторичного муллита [24, 26–28]. Обжиг



в туннельной печи приводит к кардинальному изменению соотношения компонентов фаз – содержание муллита значительно увеличивается, при этом количество корунда уменьшается [24, 26, 27], количество SiC в следствие его окисления значительно уменьшается (рис. 3 б) [5, 20, 21, 25].

При помощи сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения "Tescan Mira 3" (Чехия), оснащенного энергодисперсионным спектрометром "Oxford Instruments X-Max 50" (Англия), изучались сколы образцов, обожженных при температуре 1150 °C и в туннельной печи исходного состава и с добавкой 15 % SiC после их испытания на прочность при изгибе. На рис. 4 -7 приведены электронные фотографии структуры образцов с наложением карт распределения элементного состава и спектры ЭДС всей видимой области [20, 24]. На образцы нанесён токопроводящий слой (хром толщиной 5 нм).

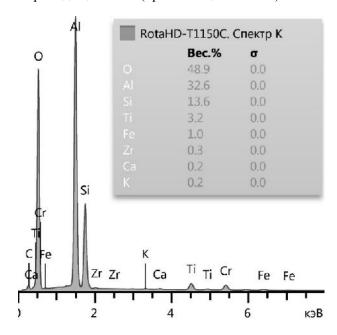
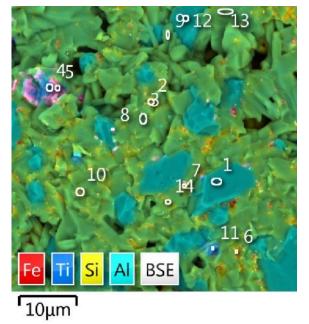


Рис. 4. Электронные снимки структуры образцов исходный состав (Al_2O_3 – SiO_2) после обжига при 1150 °C: корунд (участок № 1, 3); соединения на основе титана (участок № 2, 7, 9, 13, 14); стекло (участок № 4, 5, 11, 15), кристобалит (участок № 16); муллит (участок № 3, 10); магнетит (участок № 8, 17)

Анализ минерального состава, представленного на электронных снимках (рис. 4-7) показал, что преимущественными фазами корунд муллит. Стеклофаза являются И распределена равномерно во всем объеме образцов (рис. 4, 5). В отдельных участках определются: SiC, кристобалит, соединения на основе титана и железа. После обжига при 1150 °C (рис. 4, 6) фиксируются тонкопленочные агрегатные сростки вторичного муллита с зернами корунда, что сопровождается образованием пористо – ячеистой микроструктуры (на снимках темное - поры, светлое - минералы) [24]. На (рис. 6) определяется SiC (участок 1), с повышением

 $T_{\text{обж}}$ SiC окисляется до SiO₂ с образованием кристобалита (рис. 7, участок 3). Необходимо отметить, что при $T_{\text{обж}}$ (1300–1400 °C) характерен интенсивный синтез муллита и его срастание с зернами корунда в единый кристаллический сросток (рис. 5, 7). За процессом активного образования приводящего вторичного муллита, образованию "замуллитизированной" матрицы, следует стадия спекания замуллитизированного материала, подтверждается что дилатометрическими исследованиями Длительная выдержка (при температуре 1300-1400 °C 60 часов) приводит к рекресталлизации муллита, размер кристаллов увеличивается, примерно в 10 раз – с 0,5 мкм до 6 мкм (по длине призматической формы, рис. 5, 7) [24, 28]. При определении минерально-химической природы

состава образцов применяли элементный спектральный анализ, который также приведен на рис. 4—7.



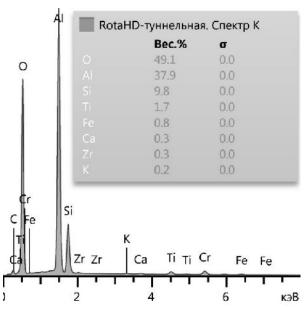
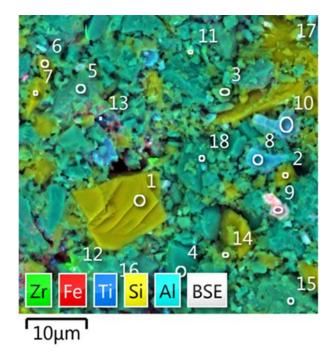


Рис. 5. Электронные снимки структуры образцов исходный состав (Al_2O_3 – SiO_2) после обжига в туннельной печи: корунд (участок № 1, 12); соединения на основе титана (участок № 4, 8, 11); стекло (участок № 2, 6, 7, 10, 14); муллит (участок № 3, 9, 13); гематит (участок № 5)



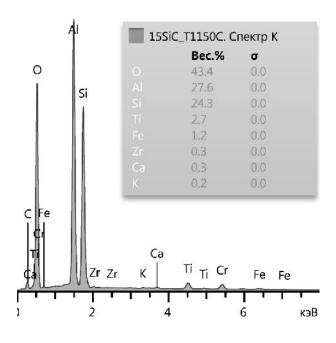


Рис. 6. Электронные снимки структуры образцов в системе Al_2O_3 – SiO_2 – SiO_2 – SiO_0 после обжига при 1150 °C: SiC (участок № 1); корунд (участок № 4, 16); муллит (участок № 3, 5, 15, 18); кристобалит (участок № 14); соединения на основе титана (участок № 8, 10, 11, 13); стекло (участок № 2, 6, 7, 12, 17); гематит (участок № 9)

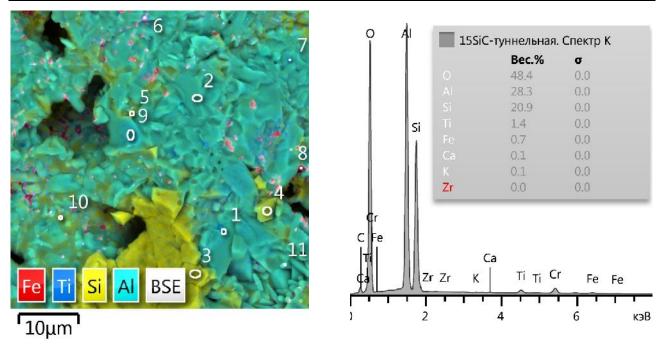


Рис. 7. Электронные снимки структуры образцов в системе Al_2O_3 – SiO_2 –SiC после обжига в туннельной печи: корунд (участок № 1); муллит (участок № 2, 9, 8, 11); соединения на основе титана (участок № 7); кристобалит (участок № 3, 4); стекло (участок № 5, 10); гематит (участок № 6)

Влияние продолжительности высокотемпературной термообработки образцов на их основные характеристики. Обобщающие данные по влиянию продолжительности термообработки в интервале 1300–1400 °C на основные характеристики образцов материала с содержанием 15 % SiC приведены на рис. 8. Выбор именно этого интервала температур, характеризуемого максимальной скоростью как муллитизации, так и окисления SiC, сделан исходя из данных предшествующих исследований [19-21]. На рис. 8 приведены гистограммы, характеризующие изменения открытой пористости ($\Pi_{om\kappa}$), кажущейся плотности (p_{κ}) , роста размеров (Pocm) и увеличения масс (m_{np}) образцов вследствие окисления, а также окисления SiC ($K_{o\kappa}$) и предела прочности на изгиб ($\delta_{uзz}$) при изменении продолжительности времени (т) пребывания образцов в отмеченном интервале температур от 1,0 до 120 часов. При этом данные по росту, m_{np} и $K_{o\kappa}$ при минимальном значении τ (1 час) получены на образце после его повторного нагрева в дилатометре в интервале 1300-1400 °C (скорость нагрева 300 °C в час) и охлаждения. Как было показано в работе [21] в режиме обжига печи для обжига динаса продолжительность пребывания образцов в интервале 1300-1400 °C составляет около 60 часов и 120 часов в случае двукратного обжига. При обжиге в лабораторной печи с продолжительностью изотермической выдержки 5 часов при 1400 °C общая продолжительность т в области 1300-1400 °С составила 8 часов.

Из рис. 8, а, б следует, что исходные образцы (после сушки) характеризовались пористостью

 $\Pi_{om\kappa} = 17 \%$ и кажущейся плотностью $p_{\kappa} = 2.85$ $\Gamma/\text{см}^3$. Минимальное значение $\Pi_{om\kappa}$ (2,7 %) отмечается при значении т термообработки 8 часов. Несмотря на резкое падение пористости показатель p_{κ} понизился до 2,81 г/см³, что обусловлено не только определенной степенью муллитизации или окисления SiC, но и образованием значительного объема закрытой пористости [20]. С увеличением продолжительности процесса т до 60 и 120 часов показатели $\Pi_{om\kappa}$ существенно увеличиваются, а p_{κ} – резко падают. При этом резкое изменение этих показателей отмечается при увеличении т от 8 до 60 часов (рис. 8, а, б). При увеличении времени т пребывания образцов в температурном интервале 1300 – 1400 °C с 60 до 120 часов изменение этих параметров относительно незначительны.

Между рассмотренными показателями Π_{omk} и p_{κ} и аналогичными значениями роста образцов (в) и увеличения их массы (г) отмечается закономерная взаимосвязь. Так, при увеличении τ с 8 до 60 часов показатели $\Pi_{om\kappa}$ и роста (позиции 2 и 3) увеличиваются в 8,6 и 8,1 раза. Показатели же относительного изменения $\Pi_{om\kappa}$ и роста при увеличении т с 60 до 120 часов многократно меньшие в 1,2 и 1,1 раза. Отмеченная особенность изменения рассмотренных показателей по мере увеличения т преимущественно обусловлена кинетикой окисления SiC. Как следует из данных рис. 8, д на стадии увеличения т от 1 до 8 часов показатель $K_{o\kappa}$ существенно возрастает, достигая 40 %. При увеличении τ от 8 до 60 часов $K_{o\kappa}$ увеличивается более чем в 2 раза и достигает 90 %. Последующий же рост т до 120 часов сопровождается увеличением K_{OK} до 97 %. Значения предела прочности образцов материала (рис. 8, е) определяются преимущественно показателями Π_{Omk} и p_{K} . Резкое падение δ_{usc} (с 120 до 80 МПа) отмечается

при увеличении времени τ с 8 до 60–120 часов. Минимальным значениям σ_{usc} соответствуют максимальные значения $\Pi_{om\kappa}$ и минимальные показатели p_{κ} .

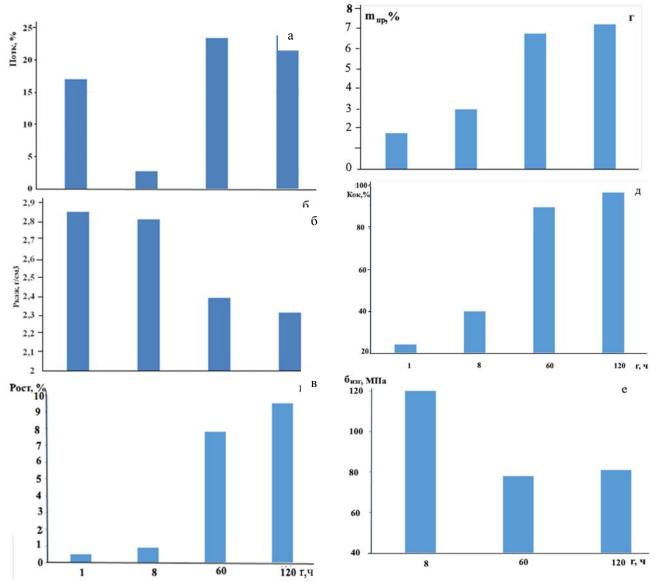


Рис 8. Гистограммы $\Pi_{om\kappa}$ (a); p_{κ} (б); роста (в); m_{np} (г); $K_{o\kappa}$ SiC (д) и δ_{use} (е) образцов с 15 % SiC после их термообработки в интервале температур 1300 – 1400 °C с разным τ (час): 1; 8; 60 и 120

Выводы. Изучено влияние длительной термообработки на свойства образцов, полученных на основе ВКВС в системе $Al_2O_3 - SiO_2 - SiC$, исследованы их показатели. Образцы, содержащие 15 % SiC после длительной термообработки (120 часов в интервале температур 1300-1400 °C) характеризуются существенным ростом (до 9 %), увеличением пористости и уменьшением прочности по сравнению с исходными образцами (без SiC). Значительный рост объема образцов обусловлен не только за счет окисления SiC, но и дополнительным муллитообразованием. Предполагается, что последовательно за процессом окисления SiC на определенном этапе термообработки протекает процесс муллитизации за счет взаимодействия новообразованного SiO₂ в форме

кристобалита с Al₂O₃ боксита. С применением комплекса методов исследований (РФА, электронной микроскопии) охарактеризованы фазовый состав и структура материалов после обжига в окислительной среде в интервале температур 1000-1400 °C и туннельной печи. Установлено, что основным процессом фазовых превращений является образование вторичного муллита. После обжига в туннельной печи в окислительной среде при нахождении в области температур 1300-1400 °C в течение 60 часов исходные образцы на основе ВКВС боксита Rota – HD с 11 % кварцевого стекла характеризуются следующим фазовым составом, %: корунд – 55; муллит – 33; кристобалит-5; стекло – 4; соединения на основе титана железа остальное, образцы

с 15 % SiC, %: муллит – 64; корунд – 14; SiC – 4; стеклофаза – 14; соединений на основе титана и железа остальное.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Пивинский Ю.Е. Керамические и огнеупорные материалы. Избранные труды. Т.2 СПб.: Стройиздат. 2003. 668 с.
- 2. Гавшина О.В., Дороганов В.А., Дороганов, Е.А., Онищук В.И., Трепалина Ю.Н. Высокоглиноземистые массы на основе пластифицированных суспензий боксита // Новые огнеупоры. 2019. № 7. С. 31–35.
- 3. Сакулин А.В., Скурихин В.В., Белова И.Г. и др. Гайанский боксит сырье для производства высокоглиноземистых огнеупоров// Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 11-12. С. 38–43.
- 4. Гегтас С., Унлу Н., Одабаси А. и др. Влияние температуры обжига на свойства огнеупорных бетонов на основе боксита // Новые огнеупоры. 2012. № 1. С. 24–30.
- 5. Пивинский Ю. Е., Дякин П.В., Гришпун Е.М., Гороховский А.М. Бесцементные огнеупорные бетоны. Часть 2. Высокоглиноземистые и корундовые керамобетоны// Новые огнеупоры.2019. № 11. С. 39–48.
- 6. Пивинский Ю. Е., Дякин П.В., Остряков Л.В. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 14. Состав и некоторые свойства керамобетонов композиционного состава в системе $Al_2O_3 SiO_2 SiC C$ // Новые огнеупоры. 2018. №2. С. 24–31.
- 7. Xu P.K. Technical properties of bauxite SiC and application in cement rotary kiln. // Cem. Guede New Epoch . 2010. № 6. P. 51 55.
- 8. Xu P.K. The study of bauxite—SiC refractories // Refract. Lime. 2013. v 38. № 17. Pp. 10–14.
- 9. Bo. Ren., Shaobai S., Yawei Li. Effects of oxidation of SiC aggregates on the microstructure and properties of bauxite SiC composite refractories // Ceramics International. 2015. Vol. 41. Pp. 2892–2899.
- 10. Wei Z., Wenyong D., Chiyoda N. Research on thermal shock resistance of mullite-bauxite-silicon carbide castable refractory // Chin. J. Geochem. 2012. №31. Pp. 204–208.
- 11. Yay B., Karakus C., Akinci E. Investigation of the effect of silicon carbide additive on mechanical and thermal properties of alumina silicate refractories // 19 th International Metallurgy Materials Congress., Stambul, Turkey. 2018. Pp. 386–389.
- 12.Дороганов В.А., Трепалина Ю.Н. Высококонцентрированные керамические вяжущие суспензии на основе карбида кремния // Новые огнеупоры. 2010. №8. С. 50–52.

- 13. Дороганов В.А., Перетокина Н.А., Дороганов Е.А., Бедина В.И., Данилова О.Ю., Гоголевская О.В. Огнеупорные материалы на основе искусственных керамических вяжущих суспензий карбидкремниевого состава // Вестник БГТУ им В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 156–160.
- 14. Дороганов В.А., Перетокина Н.А., Дороганов Е.А., Евтушенко Е.И., Данилова О.Ю. Исследование наномодифицированных вяжущих карбида кремния и композитов на их основе // Новые огнеупоры. 2014. № 9. С. 44–47.
- 15. Зайцев С.В., Дороганов В.А., Дороганов Е.А., Евтушенко Е.И. Исследование свойств наносодержащих искусственных керамических вяжущих в системе $Al_2O_3 SiO_2 SiC$ // Новые огнеупоры. 2016. № 10. С. 32–36.
- 16. Зайцев С.В., Дороганов В.А., Дороганов Е.А., Евтушенко Е.И. Исследование искусственных керамических вяжущих муллитокарбидкремниевого состава и композитов на их основе // Новые огнеупоры. 2017. № 2. С. 46–49.
- 17. Зайцев С.В. Дороганов В.А., Дороганов Е.А., Евтушенко Е.И., Сыса О.К. Искусственные керамические вяжущие на основе кремния и карбида кремния для карбидкремниевых огнеупоров на нитридной связке // Новые огнеупоры. 2019. N 9. С. 25–30.
- 18. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3 SiO_2 SiC$. Часть 1// Новые огнеупоры. 2018. № 3. С. 17–27.
- 19. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3 SiO_2 SiC$. Часть 2// Новые огнеупоры. 2018. № 5. С. 22–27.
- 20. Дякин П.В., Пивинский Ю.Е. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3 SiO_2 SiC$. Часть 3// Новые огнеупоры. 2018. № 9. С. 14–22.
- 21. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В. Исследования в области композиционных ВКВС и огнеупорных материалов на их основе в системе $Al_2O_3 SiO_2 SiC$. Часть 4 // Новые огнеупоры. 2019. № 3. С. 21–27.
- 22. Пивинский Ю.Е., Гришпун Е.М., Гороховский А.М. Разработка технологий, производство и служба формованных и неформованных огнеупоров на основе ВКВС// Новые огнеупоры. 2015. № 5. С. 29–39.
- 23. Пивинский Ю. Е., Дякин П.В., Остряков Л.В. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 12. ВКВС

композиционного состава: боксит, электрокорунд, кварцевое стекло и некоторые свойства материалов на их основе// Новые огнеупоры. 2017. \mathbb{N} 10. C. 15–21.

24. Пивинский Ю. Е., Перепелицын В.А., Дякин П.В. и др. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 13. Влияние температуры обжига на фазовый состав, структуру и некоторые свойства материалов на основе ВКВС композиционного состава: боксит, электрокорунд, кварцевое стекло // Новые огнеупоры. 2017. № 12. С. 27–35.

25. Перепелицын В.А., Остряков Л.В. Дунаева М.Н. и др. Фазовые превращения бетонов системы $Al_2O_3 - SiO_2 - SiC$ при испытании на шлакоустойчивость// Новые огнеупоры. 2018. № 7. С. 29–38.

26. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В., Колобов А.Ю. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 6. О процессе муллитизации и тепловом расширении материалов на основе ВКВС композиционного состава // Новые огнеупоры. 2016. № 6. С. 31–38.

27. Пивинский Ю.Е., Дякин П.В. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 7. О спекании и вторичном муллитообразовании материалов на основе ВКВС композиционного состава в процессе неизотермического нагрева и изотермического обжига// Новые огнеупоры. 2016. № 10. С. 42–51.

28. Андрианов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В. и др. Химическая технология керамики. Под ред. И.Я. Гузмана. М.: "Стройматериалы", 2012. 496 с.

Информация об авторах

Дякин Павел Васильевич, кандидат технических наук. E-mail: ceramika-1@mail.ru. ООО НВФ "Керамбет - Огнеупор", Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, а/я 10/2.

Пивинский Юрий Ефимович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель. E-mail: pivinskiy@mail.ru. ООО НВФ "Керамбет - Огнеупор" Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, а/я 10/2..

Прохоренков Дмитрий Станиславович, инженер-исследователь центра высоких технологий. E-mail: tsk_bgtu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. Е-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в ноябре 2019 г.

© Дякин П.В., Пивинский Ю.Е., Прохоренков Д.С., Дороганов В.А., 2020

¹Dyakin P.V., ¹Pivinskii Yu. E., ²Prokhorenkov D. S., ²,*Doroganov V.A.

¹OOO NVF Kerambet-Ogneupor ²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov *E-mail: dva vadjik1975@mail.ru

EFFICIENCY OF REINFORCEMENT OF TECHNOLOGICAL SOIL BY MINERAL MODIFIERS

Abstract. The effect of temperature and duration of heat treatment of samples based on a highly concentrated ceramic binder suspension (HCBS) of a composite composition (bauxite + 11 % VDKS), as well as with an additional content of 15 % silicon carbide on their phase composition, structure, and some properties is studied. Long-term heat treatment (60 and 120 hours) in the temperature range 1300–1400 °C is carried out in a tunnel kiln for firing dinas. In the process of heat treatment, the process of formation of secondary mullite, the oxidation of SiC followed by mullite formation, proceeds. The influence of the heat treatment duration on the phase composition, as well as the strength, apparent density, growth, SIC oxidation state, and bending strength of samples containing 15 % SiC are characterized. It is found that the minimum porosity value (2.7 %) is observed when the heat treatment duration is 8 hours. This drop in porosity and a slight decrease in density is due to a certain degree of mullitization or SiC oxidation, but also to the formation of a significant volume of closed porosity. With increasing the duration of the firing process to 60 and 120 hours, the porosity indicators increase significantly, and the density decreases sharply.

Keywords: chinese bauxite, SiC, quartz glass, mullite, cristobalite corundum, thialite, mullitization, phase composition, HCBS, VDKS (highly dispersed quartz glass).

REFERENCES

- 1. Pivinskii Yu.E. Ceramic and Refractory Materials. Selected Works 2. [Keramicheskie i ogneuporniy materialy. Izbrannye Trudy] iSt. Petersburg: Publishing House of the «Building publisher». 2003, 668 p. (rus)
- 2. Gavshina O.V., Doroganov V.A., Onishchuk V.I., Trepalina Yu.N. High-Alumina Mixes Based on Molded Bauxite Suspensions. Refractories and Industrial Ceramics. 2019. Vol. 60. No. 4. Pp. 350–354.
- 3. Sakulin A.V., Skurikhin V.V., Belova I.G. and others. Guyana bauxite raw materials for the production of high-alumina refractories [Gaynskii boksit syrie dly proizvodstva vysokoglinozemistyh ogneuporov]. Refractories and Industrial Ceramics. 2015. No. 11–12. Pp. 38–43. (rus)
- 4. Göğtaş C., Ünlü N., Odabaşı A., Sezer L., Güner Ş., Göller G., Eruslu M.N. Effects of firing temperature on the physical properties of a bauxite-based refractory castable. Refractories and Industrial Ceramics. 2012. Volume 53. Issue 1. Pp. 19–25.
- 5. Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Grishpun E.M., Grohovskii A.M. Cementless refractory concrete. Part 2. High alumina and corundum ceramics. Refractories and Industrial Ceramics. [Bestsement-nyye ogneupornyye betony. Chast' 2. Vysokoglinozemistyye i korundovyye keramobetony]. New Refractories. 2019. No. 11. Pp. 39–48. (rus).
- 6. Pivinskii Yu.E., Dyakin P.V., Ostryakov L.V. Research in the Field of Preparing Molded and Unmolded Refractories Based on High-Alumina HCBS. Part 14. Composition and Some Properties of Composite Composition Ceramic Concretes in the System Al₂O₃–SiO₂–SiC–C. Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 59. Issue 1. Pp. 63–70.
- 7. Xu P.K. Technical properties of bauxite SiC and application in cement rotary kiln. Cem. Guede New Epoch . 2010. No. 6. Pp. 51–55.
- 8. Xu P.K. The study of bauxite—SiC refractories. Refract. Lime. 2013. V 38. No. 17. Pp. 10–14.
- 9. Bo. Ren., Shaobai S., Yawei Li. Effects of oxidation of SiC aggregates on the microstructure and properties of bauxite SiC composite refractories. Ceramics International. 2015. Vol. 41. Pp. 2892–2899.
- 10. Wei Z., Wenyong D., Chiyoda N. Research on thermal shock resistance of mullite-bauxite-silicon carbide castable refractory. Chin. J. Geochem. 2012. No. 31. P. 204–208.
- 11. Yay B., Karakus C., Akinci E. Investigation of the effect of silicon carbide additive on mechanical and thermal properties of alumina silicate refractories. 19 th International Metallurgy Materials Congress., Stambul, Turkey. 2018. Pp. 386–389.
- 12.Doroganov V.A., Trepalina Yu. N. Highly concentrated ceramic binder suspensions based on

- silicon carbide. Refractories and Industrial Ceramics. 2010. Vol. 51. Pp. 302–304.
- 13.Doroganov V.A., Peretokina N.A., Doroganov E.A., Bedina V.I., Danilova O.Yu., Gogolevskay O.V. Refractory materials based on artificial ceramic cementitious suspensions of silicon carbide composition [Ogneupornye materialy na osnove iskusstvinnyh keramicheskih vygushih suspinzii karbidkremnievogo sostava]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 4. Pp. 156–160. (rus)
- 14.Doroganov V.A., Evtushenko E.I., Peretokina N.A., Doroganov E.A., Danilova O. Yu. Study of Nano-Differentiated Silicon Carbide Binders and Composites Based on Them. Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol/ 55. Issue 5. Pp. 465–468.
- 15.Zaitsev S. V., Doroganov V.A., Doroganov E. A., Evtushenko E. I. Study of Artificial Ceramic Binder Properties in the System Al₂O₃–SiO₂–SiC. Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 57. No. 5. Pp. 526–530.
- 16. Zaitsev S. V., Doroganov V.A., Doroganov E. A., Evtushenko E. I. Study of artificial ceramic binders of mullite-silicon carbide composition and composites based on them. Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 58. No. 1. Pp.109–112.
- 17.Zaitsev S.V., Doroganov V.A., Doroganov E. A., Evtushenko E. I., Sysa O.K. Artificial ceramic binders based on silicon and silicon carbide for silicon carbide refractories based on nitride bonding [Iskusstvennye kermicheskie vygushie na osnove kremniy I karbida kremniy dly karbidkremnievyh ogneuporov na nitridnoi svyzke]. New refractories. 2019. No. 9. Pp. 25–30. (rus)
- 18.Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al₂O₃–SiO₂–SiC. Part 1. Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 59. Issue. 2. Pp. 124–133.
- 19.Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al₂O₃–SiO₂–SiC. Part 2. Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 59. Issue. 3. Pp. 247–251.
- 20.Dyakin P. V., Pivinskii Yu. E. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al₂O₃–SiO₂–SiC. Part 3. Refractories and Industrial Ceramics. 2019. Vol. 59. Issue. 5. Pp. 445–453.
- 21.Dyakin P. V., Pivinskii Yu. E. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al₂O₃–SiO₂–SiC. Part 4. Refractories and Industrial Ceramics. 2019. Vol. 60. Issue. 2. Pp. 142–148.
- 22. Pivinskii Yu.E., Grishpun E.M., Grohovskii A.M. Engineering, Manufacturing, and Servicing of Shaped and Unshaped Refractories Based on Highly

Concentrated Ceramic Binding Suspensions. Refractories and Industrial Ceramics. 2015. Vol. 56. Issue. 3. Pp. 245–253.

23. Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Ostryakov L. V. Research in the Field of Preparing Molded and Unmolded Refractories Based on High-Alumina HCBS. Part 12. Composite Composition HCBS (Bauxite Electrocorundum, Quartz Glass) and some Properties of Materials Based Upon Them. Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 58. Issue. 5. Pp. 514–520.

24.Pivinskii Yu.E., Perepelitsyn V.A., Dyakin P.V., Kolobov A.Yu., Prokhorenkov D.S. Research in the Field of Preparing Molded and Unmolded Refractories Based on High-Alumina HCBS. Part 13. Effect of Firing Temperature on Phase Composition, Structure, and Some Properties of Materials Based on Composite Composition HCBS (Bauxite, Electrocorundum, Quartz Glass). Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Volume 58. Issue. 6. P. 652-659.

25.Perepelitsyn V.A., Ostryakov L.V., Dunaeva M.N., Kolobov A.Yu. Phase Transformations of

Concrete of the Al₂O₃–SiC–C System During Slag Resistance Testing. Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 59. Issue. 4. Pp. 350–358.

26.Pivinskii Yu.E., Dyakin P.V., Kolobov A.Yu. Research in the Field of Preparing Molded and Unmolded Refractories Based on High-Alumina HCBS. Part 6. Mullitization and Thermal Expansion of Materials Based on Compound Composition HCBS. Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Vol. 57. Issue. 3. Pp. 297–303.

27. Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E. Research in the Field of Preparing Molded and Unmolded Refractories Based on High-Alumina HCBS. Part 7. Sintering and Secondary Mullite Formation of Materials Based on Composite Composition HCBS During Nonisothermal Heating and Isothermal Firing. Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 57. Issue 5. Pp. 536–544.

28. Andrianov N.T., Balakevich V.L., Belykov A.V. and others. Chemical technology of ceramics. Edited by I.Y. Guzman [Khimicheskaya tekhnologiya keramiki]. M.: "Building materials", 2012. 496 p. (rus)

Information about the authors

Dyakin Pavel V. PhD. E-mail: ceramika-1@mail.ru. OOO NVF Kerambet-Ogneupor. Russia, 191002, St. Petersburg.

Pivinskii Yurii E. DSc, Professor. E-mail: pivinskiy@mail.ru. OOO NVF Kerambet-Ogneupor. Russia, 191002, St. Petersburg.

Prokhorenkov Dmitrii S. Research Engineer. E-mail: tsk_bgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Doroganov Vladimir A. PhD. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in November 2019

Для цитирования:

Дякин П.В., Пивинский Ю.Е., Прохоренков Д.С., Дороганов В.А. Фазовый состав, структура и некоторые свойства материалов на основе ВКВС боксита композиционного состава в системе $Al_2O_3 - SiO_2 - SiC$ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 115–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-115-125

For citation:

Dyakin P.V., Pivinskii Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. Efficiency of reinforcement of technological soilby mineral modifiers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 115–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-115-125

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-126-133

 1 Кожухова Н.И., 1 Жерновская И.В., 1 Череватова А.В., 2 Соболев К.Г.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова ²Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин, США *E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

РОЛЬ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО КОМПОНЕНТА В СОСТАВЕ ПЕРЛИТОВОГО ГЕОПОЛИМЕРА НА ЕГО ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ

Аннотация. Как правило, компонентный состав строительных материалов вносит значительный вклад в формирование их конечных эксплуатационных свойств. Кроме того, в новых типах вяжущих систем, не смотря на их слабую изученность, также обнаружено это влияние отдельных компонентов на особенности структуры и свойства конечного композита. В рамках статьи эта взаимосвязь изучена на примере перлитовых геополимерных вяжущих.

В данном исследовании было выявлено, что использование мельницы с металлической футеровкой приводит к образованию железосодержащего намола, который становится неотъемлемой частью измельчаемого сырья (перлита).

Установлено, что частицы образующегося железосодержащего компонента являются наноразмерными.

Для выявления характера влияния железосодержащего компонента на фазовые изменения перлитового геополимера в качестве аналитической базы использовалась рентгеновская спектроскопия.

Микроструктурные особенности вяжущего были изучены с помощью РЭМ-микроскопии. Фазовоминеральный состав затвердевшего геополимерного камня, полученный с помощью РФА-анализа, показал, что в процессе твердения в геополимерной системе образуется наноразмерный гидроксид железа или берналит $Fe(OH)_3(H_2O)_{0.25}$, объем элементарной ячейки которого на атом Fe в 4,5 раза больше, чем у металлического железа, что инициирует разрушение структуры. Это подтверждается низкими результатами прочности на сжатие перлитового геополимерного камня.

Ключевые слова: железосодержащий компонент, металлический намол, геополимерное вяжущее, рыхлая структура, формула Шеррера

Введение. При производстве строительных композитов используется широкий спектр сырьевых компонентов. При этом значительная их доля перед применением в производственном процессе подвергается предварительной доработке в форме домола до требуемой дисперсности [1–7], поскольку дисперсность является одним из ключевых индикаторов, определяющих реакционную активность сырья, отвечающую за качество и эксплуатационные характеристики конечного продукта.

Механоактивация является одним из широко применяемых методов повышения реакционной активности сырьевых компонентов природного и техногенного происхождения, а также вяжущих систем. В работе [8] изучено влияние механоактивации цемента на изменение его гранулометрических характеристик и установлено, что использование механоактивированного цемента даже в малых количествах в общем объеме вяжущего (до 10 %) приводит к повышению прочностных показателей.

Как правило, при проведении научных исследований для механоактивации используются помольные агрегаты различного типа и футеровки, а также различные среды (сухой мокрый помол) [9]. Зачастую такие исследования направлены на изучение микроструктурных и морфологических изменений измельчаемых материалов в зависимости от длительности механоактивационного процесса.

Однако, в производственных масштабах активно используются металлические мельницы. Как правило, в процессе интенсивного помола в таких мельницах образуется металлический (Ме) намол от футеровки и мелющих тел [9–11].

Ранее бы изучено влияние Ме-намола в вяжущих системах на цементной основе [12].

В свою очередь, технология получения геополимерных вяжущих систем при использовании природных и техногенных сырьевых компонентов предусматривает перименение тонкодисперсного сырья и, поэтому, зачастую, включает механоактивацию в процессе помола [13].

Ранее [14] было установлено, что катионы железа, присутствующие в составе геополимерного вяжущего, выступают в качестве инертного компонента и не участвуют в процессах геополимеризации. Другими словами, чем выше концентрация катионов железа в щелочеалюмосиликатной системе, тем ниже реакционная активность вяжущего в целом, которая в значительной степени отражается на прочностных характеристиках геополимерного камня [15].

Недавними исследованиями ведущих австралийских ученых в области вяжущих щелочной активации [16] была выдвинута гипотеза о том, что валентность и координационное число катионов железа могут оказывать влияние на их структурообразующую роль в вяжущей системе. Так, катионы Fe^{2+} и Fe^{3+} с координационным числом 5 в щелочеактивированной алюмосиликатной системе функционируют подобно катионам щелочных металлов в качестве активирующих компонентов.

В то же время, катионы Fe^{3+} с координационным числом 4 выступают в качестве структурообразующего компонента аналогично катионами Al^{3+} .

Однако, следует отметить, что в приведенных выше данных речь идет о железосодержащем (Fe) компоненте в оксидной форме. В рамках этого исследования намол, образующийся в процессе диспергации перлита, представляет собой наноразмерное металлическое железо, влияние которого в геополимерных системах на сегодняшний день практически не изучено.

Исследования направлены на изучение возможного эффекта наноразмерного металлического железа, образующегося в качестве намола на особенности твердения геополимерных систем.

Материалы и методы

Материалы. Для оценки влияния Fекомпонента (металлического железа) на особенности структурообразования в геополимерной системе, в рамках данного исследования был использован один из представителей природных алюмосиликатов кислого состава — перлит (Мухор-Талинское месторождение, РФ); два вида щелочных компонентов: NaOH и KOH.

Fе-компонент был введен в геополимерную систему искусственно в виде металлического железа путем помола перлита в планетарной мельнице МП/0,5 с металлической футеровкой.

С целью количественной оценки и сравнения, параллельно с помолом в планетарной мельнице, часть перлита была измельчена в валковой шаровой мельнице с уралитовой футеровкой, исключающей металлический намол.

Методы. Рентгенофазовый (XRD) и рентгено-флуоресцентный (XRF) анализы были использованы для изучения химического и фазовоминерального составов перлита и геополимерного вяжущего.

Образцы для XRF и XRD-анализов были подготовлены с использованием метода взаимной нагрузки. Полученные таблетки были проанализированы с помощью спектрометра WorkStation ARL 9900 (Thermo Scientific, USA), с использованием излучения Со-анода.

Качественный XRD анализ был осуществлен с использованием базы данных PDF-2. Для осуществления полнопрофильного количественного XRD анализа было использовано программное обеспечение DDM v.1.95e в алгоритме DDM (Derivative Difference Minimization). Основное преимущество использования алгоритма DDM для осуществления полнопрофильного количественного XRD-анализа состоит в том, что нет необходимости пересчета параметров фона рентгеновского дифракционного образца. Это существенно упрощает процедуру анализа, поскольку фон XRD-образцов исследуемых компонентов имеет сложную структуру, и его аппроксимация является источником дополнительных погрешностей.

Оценка размеров кристаллитов Fe-компонента в составе перлита, а также в составе геополимерного вяжущего осуществлялась расчетным путем с использованием классической формулы Шеррера (1):

$$d = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta},\tag{1}$$

где K — это постоянная Шеррера (фактор формы, безразмерная величина); λ — длина волны рентгеновского излучения; β — полуширина рефлекса на полувысоте; θ — угол диффракции (угол Брегга).

Объемы элементарных ячеек фазовых компонентов перлита и геополимерного вяжущего на его основе были взяты из международной базы данных ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

Морфология поверхности образцов геополимерного вяжущего была изучена с помощью растровой электронной микроскопии РЭМ. Поверхность образцов была покрыта слоем углерода и исследована с помощью электронного сканирующего микроскопа Mira 3 FesSem (Tescan, Чехия).

Физико-механические характеристики геополимерного вяжущего определялись в соответствии со стандартом ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Экспериментальная часть. Для возможности сравнения результатов использовался перлит, измельченный в обоих мелющих агрегатах до одинаковой удельной поверхности — 450 м²/кг. Результаты химического анализа (табл. 1) показали, что измельчение в планетарной мельнице с металлической футеровкой приводит к значительному увеличению оксида FeO (до 69 % при помоле в течение 2 часов). Помол в шаровой

мельнице с уралитовой футеровкой значительных изменений в химический состав перлита не вносит.

Таблица 1 Характер изменения химического состава перлита, измельченного в различных мелющих агрегатах

		_						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Fe/Al соот- ношение	Примечание
71,97	16,34	4,43	4,63	1,07	0,872	0,74	0,61/8,45	_
				План	етарная ме	льница		
SiO ₂	Al_2O_3	Na ₂ O	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MgO	Fe	Примечание
71,88	16,3	4,09	4,1	0,73	1,47	0,37	1,03	Увеличение Fe-катионов на 69 %
SiO_2	Al_2O_3	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al	Примечание
72	16,42	4,08	4,38	0,93	0,93	0,49	8,61	Увеличение Al-катионов на 2 %

При подготовке составов геополимерного вяжущего содержание воды подбиралось в соответствии с обеспечением расплыва конуса в диапазоне 120–140 мм. После смешения водного раствора щелочных компонентов и перлита, геополимерные пасты были заформованы в формыбалочки $40 \times 40 \times 160$ мм, уплотнены на вибро-

столе и подвержены термической сушке при температуре 70 °C в течение 24 часов с дальнейшей расформовкой и выдержкой при температуре 22±3 °C и относительной влажности 55±5 % до момента испытания. Тест на прочность для геополимерных паст осуществлялся в возрасте 28 суток твердения (табл. 2).

Таблица 2 Влияние Fe-компонента на характеристики геополимерного вяжущего

ГО	Параметр									
чно	Предел прочност	и при сжатии, МПа	Средняя плотность, кг/м ³							
Вид щелочног активатора	без намола Fe-компонента	с намолом Fe-компонента	без намола Fe-компонента	с намолом Fe-компонента						
NaOH	36,9	31,8	1743	1726						
KOH	36,1	30,4	1735	1712						

Результаты XRD-анализа (рис. 2) подтверждают образование металлического намола после помола в планетарной мельнице, в то время

как ренггенограмма перлита, молотого в шаровой мельнице, не продемонстрировала появление пика, отвечающего за железосодержащие фазы, (рис. 3).



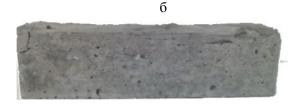


Рис. 1. Визуальная оценка образцов геополимерных вяжущих с использованием NaOH-активатора: A – без намола Fe-компонента; б – с намолом Fe-компонента

Наноразмерность образующегося Fекомпонента, содержащегося в механоактивированном перлите, подтверждается его высокой реакционной активностью, что в процессе щелочной активации позволяет ему активно вступать

во взаимодействие с молекулами воды или гидроксид ионом OH^- с образованием гидратных фаз типа берналита $Fe(OH)_3(H_2O)_{0.25}$.

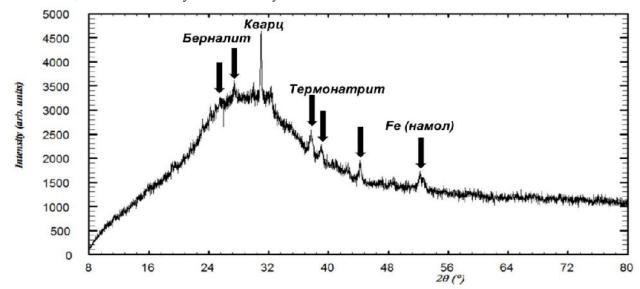


Рис. 2. Рентгенограмма геополимерного вяжущего на основе перлита, молотого в планетарной мельнице в течение 24 часов

Согласно полученным данным, присутствие наноразмерного металлического железа вызывает деструктивные процессы при твердении геополимерного вяжущего (рис. 1) и способствует

снижению прочностных характеристик на 13–16 %, а также снижению плотности (на 1–1,3 %).

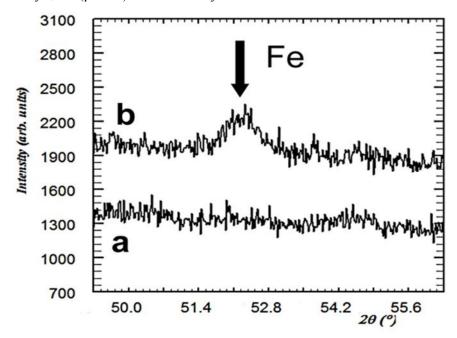


Рис. 3. Сравнительный анализ рентгенограмм перлита, молотого в разных помольных агрегатах а) шаровой мельнице; б) планетарной мельнице

Это явление может быть связано с тем, что объемы ячеек данных гидратных образований от 3 до 4,5 раз (в пересчете на 1 атом Fe) превышают

объем исходного наноразмерного металлического железа (рис. 4).

на 1 атом Fe приходится объем $11.8 \, {\mathring{A}}^3$

на 1 атом Fe приходится объем $53.9 \, \text{Å}^3$

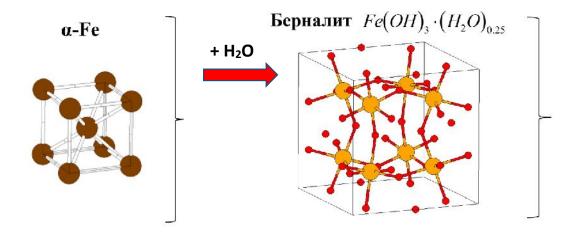


Рис. 4. Трансформация структуры металлического намола после взаимодействия с H₂O

Таким образом, увеличение объема кристаллической решетки гидроокисла железа приводит к нарушению целостности формирующегося щелочеалюмосиликатного каркаса и разрушению структуры геополимера в целом, вызывая снижение прочностных и иных эксплуатационных характеристик геополимерного камня.

Вывод. В рамках исследования установлено негативное влияние наноразмерного металлического железа в составе перлитового геополимерного вяжущего, образующегося в качестве намола в процессе диспергации перлита в мелющем агрегате с металлической футеровкой на формирование целостности структуры и, как следствие, показателей прочности в перлитовой геополимерной системе за счет образования гидратных фаз типа берналит $Fe(OH)_3(H_2O)_{0.25}$. Объем ячейки этой фазы от 3 до 4,5 раз превышает объем исходной ячейки наноразмерного металлического железа, за счет чего происходит нарушение целостности формирующегося щелочеалюмосиликатного каркаса, что приводит к разрушению структуры геополимерного вяжущего в целом.

Источник финансирования: Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Kalashnikova V.A. Influence of mechanical and chemoactivation processes on operational characteristics of geopolymer binder // Research Journal of Applied Sciences. 2015. Vol. 10. Issue. 10. Pp. 620–623.

- 2. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Trunov P.V. Reduction of energy consumption in manufacturing the fine ground cement // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. Issue. 11. Pp.745–748.
- 3. Sobolev K., Kozhukhova M., Sideris K., Menéndez E. Santhanam M. Alternative supplementary cementitious materials // RILEM State-of-the-Art Reports. 2018. Vol. 25. Pp. 233–282.
- 4. Попов А.Л., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Морфология диспергированного кремнеземистого сырья компонента композиционных вяжущих // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Современные проблемы строительной науки». 2017. С. 188–192.
- 5. Федосеева В.И., Миронова А.А. Влияние активации бентонита на его адсорбционные свойства // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2017. № 4 (60). С. 59–65.
- 6. Нелюбова В.В., Попов А.Л. Фазовые трансформации алюмосиликатных систем при их механоактивации // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2017. № 8. С. 96–98.
- 7. Фомина Е.В. Эффективность использования отходов металлургии при производстве материалов строительного назначения // Материалы 4-й международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах». 2015. С. 170–173.
- 8. Roukaya Mejdoub, Halim Hammi, Mohamed Khitouni, Joan Josep Suñol, Adel M'nif. The

effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of Portland cement: Effect of particle size and crystallinity changes // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 152. Pp. 1041–1050.

9. Jiajie Li, Michael Hitch. Structural and chemical changes in mine waste mechanically-activated in various milling environments // Powder Technology. 2017. Vol. 308. Pp. 13–19.

10.Ermolovich E.A., Ermolovich O.V. Effects of mechanical activation on the structural changes and microstructural characteristics of the components of ferruginous quartzite beneficiation tailings // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Issue 6. Pp. 1043–1049.

11.Akshata G., Patil S. Anandhan. Influence of planetary ball milling parameters on the mechanochemical activation of fly ash // Powder Technology. 2015 Vol. 281. Pp. 151–158.

12. Sobolev K., Lin Z., Cao Y., Sun H., Flores-Vivian I., Rushing T., Cummins T., Weiss W.J. The influence of mechanical activation by vibro-milling on the early-age hydration and strength development

of cement // Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 71. Pp. 53–62.

13.Fomina E.V., Strokova V.V., Kozhukhova N.I., Fomin A.E. Effect of Mechano Activation on Size Parameter of Aluminosilicate Rocks // Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9. № 22. doi: 10.17485/ijst/2016/v9i22/95545.

14.Pawlasová S., Skavara F. High-temperature properties of geopolymer materials. 3rd Conference «In Alkali activated materials-research, production and utilization». Prague. Czech Republic. 2007. Pp. 523–525.

15.Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Lebedev M.S., Sobolev K. Influence of Fe component from milling yield on characteristics of perlite based geopolymers // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. № 012148.

16.Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture // Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 85. Pp. 163–173.

Информация об авторах

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Жерновская Ирина Васильевна, старший преподаватель кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Череватова Алла Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры Технология стекла и керамики. E-mail: cherry_611@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Соболев Константин Геннадьевич, кандидат технических наук, профессор. Школа инжиниринга и прикладных наук. e-mail: k.sobolev@gmail.com. Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин. P.O. Box 413, Милуоки, WI 53201, США

Поступила в январе 2020 г.

© Кожухова Н.И., Жерновская И.В., Череватова А.В., Соболев К.Г., 2020

¹,*Kozhukhova N.I., ¹Zhernovskaya I.V., ¹Cherevatova A.V., ²Sobolev K.G.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov ²University of Wisconsin-Milwaukee E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

ROLE OF FE-BEARING COMPONENT IN PERLITE-BASED GEOPOLYMER WHEN STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS

Abstract. Normally, the component composition of building materials makes a significant contribution when formation of final performance properties of them. Moreover, new types of binding systems, in spite of their poor knowledge, this effect on the structural characteristics of final composites also takes place. In this work, perlite-based geopolymer binder as an example was studied.

In framework of the study, it was found that the application of grinding mill with a metal lining leads to the formation of Fe- milling yield, which is included into crushed raw materials (perlite) composition.

It was established that the particles of the resulting Fe- component are nanoscaled.

The X-ray phase and chemical analyses were used to determine the effect of the Fe- component on the properties of perlite-based geopolymer.

Microstructure of the hardened geopolymer paste was studied using SEM microscopy. Phase and mineral composition of geopolymer paste obtained by XRD-analysis showed, when the hardening process, nanosized iron hydroxide or bernalite $Fe(OH)_3(H_2O)_{0.25}$ is formed in the geopolymer system, that is 5 times more than metallic iron. This is initiates the structure destruction and confirmed by the low values compressive strength of the geopolymer stone.

Keywords: Fe-bearing component, metallic milling yield, geopolymer binder, friable structure, the Scherrer formula

REFERENCES

- 1. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Strokova V.V., Kalashnikova V.A. Influence of mechanical and chemoactivation processes on operational characteristics of geopolymer binder. Research Journal of Applied Sciences. 2015.Vol. 10. Issue 10. Pp. 620–623.
- 2. Lesovik V.S., Alfimova N.I., Trunov P.V. Reduction of energy consumption in manufacturing the fine ground cement. Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. Issue. 11. Pp.745–748
- 3. Sobolev K., Kozhukhova M., Sideris K., Menéndez E. Santhanam M. Alternative supplementary cementitious materials. RILEM State-of-the-Art Reports. 2018. Vol. 25. Pp. 233–282.
- 4. Popov A.L., Nelubova V.V., Strokova V.V. Morphology of dispersed SiO₂-bearing raw materials as a component in composite binders [Morfologia dispergirovannogo kremnezemistogo syiria komponenta kompositsionnyih vyazhushchih]. Sbornik nauchnyih trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyie problemyi stroitwelnoy nauki». 2017. Pp. 188–192.
- 5. Fedoseeva V.I., Mironova A.A. Bentonite properties before and after mechanoactivation according to the results of adsorption studies [Vliyanie aktivatsii bentonita na ego adsorbtsionnye svoistva]. Vestnik of North-Eastern Federal University. 2017. No 4 (60). Pp. 59–65. (rus)
- 6. Nelubova V.V., Popov A.L. Phase transformations of aluminosilicate systems during their mechanoactivation [Fazovyie transformatsii alumosilikatnyih system pri ih mehanoaktivatsii]. Energy saving technologies in regional construction complex. 2017. No. 8. Pp. 96–98. (rus)
- 7. Fomina E.V. Utilization efficiency of metallurgical waste when production of building materials [Effektivnost ispolzovania othodov metallurgii pri proizvodstve materialov stroitelnogo naznachenia]. Materialyi 4-i mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentcii, posvyashchennoy 55-letiyu stroitelnogo fakulteta i 85-letiyu BGITU «Problemyi innovatsionnigo biosferno-sovmestimogo sotcialnosovmestimogo razvitia v stroitelnom, zhilishnokommunalnom I dorozhnom komplexah». Bryansky

- gosudarstvenny inzhenerno-tehnologicheskiy universitet. 2015. Pp. 170–173. (rus)
- 8. Roukaya Mejdoub, Halim Hammi, Mohamed Khitouni, Joan Josep Suñol, Adel M'nif The effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of Portland cement: Effect of particle size and crystallinity changes. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 152. Pp. 1041–1050.
- 9. Jiajie Li, Michael Hitch. Structural and chemical changes in mine waste mechanically-activated in various milling environments. Powder Technology. 2017. Vol. 308. Pp. 13–19.
- 10.Ermolovich E.A., Ermolovich O.V. Effects of mechanical activation on the structural changes and microstructural characteristics of the components of ferruginous quartzite beneficiation tailings. International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Issue 6. Pp. 1043–1049.
- 11.Akshata G., Patil S. Anandhan. Influence of planetary ball milling parameters on the mechanochemical activation of fly ash. Powder Technology. 2015. Vol. 281. Pp. 151–158.
- 12. Sobolev K., Lin Z., Cao Y., Sun H., Flores-Vivian I., Rushing T., Cummins T., Weiss W.J. The influence of mechanical activation by vibro-milling on the early-age hydration and strength development of cement. Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 71. Pp. 53–62.
- 13.Fomina E.V., Strokova V.V., Kozhukhova N.I., Fomin A.E. Effect of Mechano Activation on Size Parameter of Aluminosilicate Rocks. Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9. No 22. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i22/95545.
- 14.Pawlasová S., Skavara F. High-temperature properties of geopolymer materials. 3rd Conference «In Alkali activated materials-research, production and utilization». Prague. Czech Republic. 2007. Pp. 523–525.
- 15.Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Lebedev M.S., Sobolev K. Influence of Fe component from milling yield on characteristics of perlite based geopolymers. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. No 012148.
- 16.Zhang Z., Provis J.L., Zou J., Reid A., Wang H. Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture. Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 85. Pp. 163–173.

Information about the authors

Kozhukhova, Natalia I. PhD, assistant professor. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Zhernovskaya, Irina V. Senior lecturer. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Cherevatova Alla V. DSc, Professor. E-mail: cherry_611@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46

Sobolev Konstantin G., PhD, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering. College of Engineering and Applied Science. E-mail: k.sobolev@gmail.com. University of Wisconsin-Milwaukee. P.O. Box 413, Milwaukee, WI 53201, USA

Received in January 2020

Для цитирования:

Кожухова Н.И., Жерновская И.В., Череватова А.В., Соболев К.Г. Роль железосодержащего компонента в составе перлитового геополимера на его фазовые и структурные трансформации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 126–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-126-133

For citation:

Kozhukhova N.I., Zhernovskaya I.V., Cherevatova A.V., Sobolev K.G. Role of Fe-bearing component in perlite-based geopolymer when structural and phase transformations. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No.2. Pp. 126–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-126-133

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-134-141

^{1,}*Кириллова Н.К., ²Алексеева А.Н., ²Егорова А.Д.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова ²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова *E-mail: kirillova nk@edu.bstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. Аддитивные технологии, позволяющие создавать различные по сложности объемные объекты становятся востребованными в разных отраслях. Наблюдается увеличение масштабов внедрения технологий 3D-печати в строительной, в том числе и в производстве керамических изделий. С помощью современных аддитивных технологий создаются разные модели, изделия и конструкции. Они могут быть сложными, их можно изготавливать из разных материалов. Эксперты размышляют, какое же будущее ждет аддитивные технологии в строительстве, а также в керамическом производстве, ведь эти технологии позволяют экономить ресурсы, сокращать время технологического процесса, формовать сложные формы.

В статье представлен аналитический обзор мирового применения аддитивных технологий в строительстве, а также при производстве керамических изделий. Рассмотрены преимущества и недостатки, возможности 3D-печати. Создание керамических трехмерных изделий — это пока малораспространенная область аддитивных технологий, требующая исследований. Производство керамических изделий, превосходящие другие материалы по высокотемпературной прочности, твердости, химической и термической стойкости имеют высокий потенциал для использования аддитивных технологий. Проанализированы типы строительных 3D-принтеров и сырья для них. Приведены результаты исследования свойств глинистого сырья Санниковского, Намцырского и Кангаласского месторождений Республики Саха (Якутия).

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D – печать, глинистое сырье, глинистые минералы, гранулометрический состав.

Введение. Применение аддитивных технологий (АТ) в производстве трехмерных изделий, посредством 3D печати, является инновационным решением. Интерес к таким технологиям возрастает с каждым днем во всем мире, так как повышается потребность рынка в более экономичных и менее трудоемких разработках. Эти изобретения нашли применения в самых разных областях производства: строительстве, судо- и машиностроении, фармакологии и медицине, нефтегазовой и сельскохозяйственной промышленности, космонавтике. Особо бурное развитие АТ протекает в зарубежных странах, таких как США, Германия, Япония и Китай, однако, на счету России имеется большое количество разработок, позволяющих получить изделия сложных форм и разных размеров [1]. Frost & Sullivan пишет, что ежегодно растет темп роста рынка в мире аддитивных технологий на 15 % [16].

Основная часть. В Frost & Sullivan к характерным особенностям мирового рынка аддитивных технологий относят следующее:

- За счет использования разных материалов, уменьшения сроков и стоимости идет быстрое развитие аддитивных технологий;
- Повышаются масштабы внедрения технологий 3D-печати в разных областях производства;

- Использование аддитивных технологий, позволяет сократить расходы и время на всех этапах разработки на 70 и более процентов;
- Увеличение объема финансирования научных исследований в сфере аддитивного производства;
- Формирование консорциумов приводит к консолидации рынка, объединяет предприятия, университеты, а также и исследовательские центры, бывших конкурентов. Каждый год появляются новые компании, но они исчезают быстро, из-за того, что не выдерживают конкуренции.
- Создание и открытие организаций, специализирующихся по аддитивным технологиям, для объединения научных кругов, занимающихся решением данных вопросов.

По информации Frost & Sullivan, доля России в мировом рынке аддитивных технологий составляет всего 1 % на 2018 год, от лидеров идет большое отставание. Такое отставание идет по всем направлениям, начиная от производства оборудования для аддитивных технологий, до сырьевых материалов [15].

Применение аддитивным технологиям нашлось и в строительстве, где технология 3D-печати позволяет значительно облегчить ряд производственных этапов. Основной проблемой на данный момент является подбор составов смесей для печатания материалов [4].

Разработка технологий строительной печати требует видения со стороны специалистов разных направлений, начиная специалистов по строительной физике и до специалистов по маркетингу [5].

Технологии 3D-печати в строительстве

Суть 3D-печати строительных конструкций является в послойном нанесении строительной смеси по CAD-модели. С помощью данной технологии изготавливаются разные строительные конструкции, бетонные изделия. При этом сокращается время цикла, в 8–12 раз, от проектирования до производства, за счет отсутствия опалубки происходит экономия средств и времени [20].

Рассмотрим основные типы строительных 3D-принтеров:

- 1. Портальные в которых печатающая головка перемещается по направляющим в пределах рабочей зоны, ограниченной по площади (X, Y координаты) опорами и по высоте (Z) расстоянием до головки при ее максимальном подъеме. Пример принтеры компаний Winsun (Китай) и ООО «Спецавиа» (АМТ резидент Сколково, Россия);
- 2. Разновидность портальных принтеров с так называемым Дельта-приводом головки. Идея нашла широкое применение в пластиковых 3D-принтерах, работающих по технологии FDM. Пример принтеры компании WASP (Италия).
- 3. Мобильные 3D-принтеры, когда 3D-принтер оснащен рукой-роботом и установлен на шасси, которое может перемещаться самостоятельно или с помощью крана.
- 4. Роботизированные комплексы: оснащены рукой-роботом КUKA, ABB и других производителей. Робот может перемещаться в пределах рабочей зоны по направляющим рельсам. При этом зона застройки практически не ограничена.
 - 5. Гибридные конструкции:
- комбинация портального 3D-принтера и робота (компания Contour crafting corporation (ССС).
- управление печатающей головкой (с использованием полярных координат) и перемещением по высоте происходит за счет использования телескопического устройства (компания Apis Cor).
- 6. Комплекс для печати сетчатых структур рука-робот для подачи металла или пластика.
- 7. 3D-принтеры большого формата для печати элементов декора, оформления фасадов, входных групп, окон и элементов интерьера, работающие по технологии FDM с использованием широкого круга термопластиков (Россия, ООО «Спецавиа») [3].

По периметру строительного объекта монтируются специальные рельсы, к которым впоследствии крепится принтер с заполненным смесью баком. Аппарат движется по этим рельсам и выдавливает строительные материалы на заданные места.

Также возможет вариант установки принтера в середину объекта. В таком случае устройство сходно с обычным строительным краном и благодаря вращению вокруг своей оси доставляет смеси уже по диаметру.

Преимуществами применения аддитивных технологий в строительстве являются уменьшение человеческих трудозатрат, расхода материалов, сроков строительства, качество конечного продукта, минимизация количества вредных отходов, возможность воплощения в жизнь любо решение [18].

Известные постройки на основе 3D-печати:

- Особняк компании Hua Shang Tengda.
- Китайские архитекторы из Hua Shang Tengda построили двухэтажный особняк площадью 4,305 кв. м с помощью аддитивных технологий за 45 дней.
 - «Офис будущего» в Дубае.
- Строительство здания было завершено в мае 2016 года. «Офис будущего» состоит из одного этажа площадью 250 кв. м. Проект выполнен за 17 дней.
 - Гостиничный комплекс в Филиппинах.
- Комплекс высотой всего в 4 метра занимает площадь 120 кв. м. На территории комплекса есть два номера и ванна-джакузи.
 - Павильон Вулкан в Пекине.
- За 30 дней на 20 принтерах (FDM) были изготовлены более 1000 деталей павильона и затем собраны вместе.
- Жилой дом, Окриджская национальная лаборатория (ORNL).
- Проект АМІЕ (интеграция аддитивных технологий и энергии) Проект состоит из напечатанного здания и автомобиля, изготовленного с применением АМ.
 - Напечатанный мост в Амстердаме [19].

Первый портальный малоформатный строительный 3D-принтер разработала и представила на рынок в 2015 г. компания из Ярославля ООО «Спецавиа», ныне резидент Сколково, торговая марка «АМТ» [17].

Технологии 3D-печати в производстве керамики

При изготовлении керамических изделий, применение аддитивных технологий по сравнению с традиционными способами обеспечивают «геометрическую гибкость» сложных деталей. Однако, из—за чрезвычайно высокой температуры термообработки керамических изделий при

3D печати возникают трудности по сравнению с полимерами, металлами. Преимуществами керамики перед полимерами является температуроустойчивость, устойчивость к воздействиям, прочность. Но использование этих преимуществ затрудняют проблемы, возникающие при 3D печати с использованием керамических порошков. Это проблемы такие, как пористость, неоднородность структуры, появляющаяся в процессе печати, появление трещин [9].

Использование аддитивных технологий ограничено следующими факторами [10-14]:

- 1. Ограничением размеров отформованного изделия рабочей зоной оборудования;
- 2. Отсутствием универсальности, узким спектром материалов: конкретный метод формования связан со строго индивидуальным набором веществ;
- 3. Низкой скоростью формования от нескольких часов до нескольких дней;
- 4. Высокими требованиями к характеристикам материалов (структура, морфология поверхности частиц, химический и фазовый состав, кристалличность, реология).

Технологическая эффективность аддитивного формования керамических изделий обусловлена:

- 1. Возможностью формования изделий сложных форм, которые затруднительно или невозможно получить посредством известных применяемых способов;
- 2. Значительным сокращением времени технологического процесса, что объясняется отсутствием необходимости проектирования и создания форм или штампов;
- 3. Быстрой коррекцией формы, адаптацией ее к меняющимся условиям технического задания или индивидуальностью в применении.

На сегодняшний день керамические изделия можно получить следующими известными способами АТ, когда изделие послойно формируется из расплавленной пластифицирующей массы, либо за счет послойного спекания полимера лазером, либо струйным моделированием 3D-модели с использованием связующих веществ или полной печатью детали посредством склеивания порошка.

В зависимости от вида применяемой АТ при изготовлении деталей используются различные типы сырья, которые обычно классифицируют следующим образом:

- Суспензии.
- Пасты.
- Порошки или порошкообразные смеси [2].

Классификация охватывает широкую область аддитивных технологий, объединяя по об-

щему принципу формования слоя различные методы 3D-печати, из них наибольшее развитие в области керамики получили следующие:

3DP – струйная печать; SLS – селективное лазерное спекание; SLM – селективное лазерное плавление (наплавка); DIP – прямая печать; SLA – стереолитография (отверждение фотополимерной смолы лазером); FDM – наплавка экструдированных паст.

Несмотря на достигнутое разнообразие аддитивных технологий, практически любая технология приготовления керамических материалов для 3D-печати предполагает введение керамической составляющей в виде специально приготовленного порошка со строго заданными характеристиками частиц.

Для изготовления керамических изделий методом SLS-печати, основанном на локальном спекании, разрабатывают порошки, которые должны обеспечивать необходимую спекаемость агломератов при воздействии на них световым излучением, а также стабильность геометрических размеров как во время проведения SLS, так и при последующем высокотемпературном обжиге заготовки и требуемую эксплуатационную прочность изделия.

Наиболее широко используемый экструзионный метод печати керамики FDM основан на послойном нанесении экструдируемого слоя пасты поверх ранее положенного слоя. Среди материалов, применяемых для этого метода, выделяют следующие основные виды:

- дисперсия керамического порошка в среде раствора полимера (способ Fused Direct Ceramic FDC) \$
- пасты, твердеющие при температуре окружающей среды (способ Robocasting RC) или осаждаемые с охлаждением (Freeze-form Extrusion Fabrication FEF).

Метод FDM получил существенное развитие благодаря совершенствованию технологии печати керамическими порошками с добавками полимерных связующих [1].

Для исключения деформации геометрии детали в процессе печати, необходимо быстрое охлаждение (до температур < 30 °C) суспензии при выходе из сопла (это достигается за счет использования системы подачи сжатого воздуха к месту инжектирования). Полученную заготовку подвергали предварительному обжигу для удаления технологической связки с последующим высокотемпературным обжигом [7].

С помощью современных аддитивных технологий создаются разные модели, изделия и конструкции. Они могут быть сложными, их можно изготовлять из разных материалов. Керамические и мраморные трехмерные объекты —

это пока неизведанная область 3D-печати. Хотя, возможно, уже и нет. Один из известных мировых брендов для 3D-печати – это принтер компании Tethon 3D. Tethon 3D – компания, которая подала заявку на патент, главным образом касающийся данного вопроса. Создание керамических трехмерных изделий – это пока малораспространенная область аддитивных технологий.

Все это объясняется необходимостью интенсивной обработки материала, включая его обжиг и глазирование. Еще одна проблема — применение порошковых исходников и связанная с этим небольшая прочность готовых изделий. Tethon 3D решила модернизировать процесс струйной 3D-печати использованием пресса. Он будет применяться с целью уплотнения свеженанесенных слоев. Это поможет улучшить плотность готовых керамических моделей после обжига.

Работоспособность данной концепции уже была подтверждена. Для этого компания использовала рабочий прототип 3D-принтера и керамические порошки собственного производства «Tethonite» [9].

В компании HRL Laboratories (США) разработали технологию 3D-печати высокопрочной керамики. Материал, который получили исследователи, HRL Laboratories обладает рекордно высокой термостойкостью, прочностью. Промышленное применение керамических материалов при создании изделий сложной формы ограничено, так как механическая обработка керамики это процесс долгий и очень дорогой, требует использования алмазных инструментов. Из-за этих расходов уходит до 80 % производственных затрат.

Тобиас Шэдлер написал, что использование 3D-печати дает возможность создавать продукцию любой геометрии, но пока с использованием данной технологии невозможно было делать высокопрочные и термостойкие керамические изделия, пригодные для инженерных разработок.

Сотрудники HRL Laboratories, Зак Эккель и Чаоинь Чжоу разработали специальный прокерамический полимер, выступающий в качестве полуфабриката, выдерживает температуры как минимум до 1700° С. После изготовления, изделие подвергается высокотемпературному обжигу, и в результате становится керамическим (состав, которого состоит из 36 % кислорода, 33 % углерода, 26 % кремния, и 4 % серы).

Технология основывается на производной от полимеров керамики. Основа ещё в 1960-х годах была придумана, в таких полимерах присутствуют основные составляющие керамики, кремний и азот. Исследователи HRL Laboratories раз-

работали новый материал, и новый процесс выращивания объекта в жидкой среде. Для производства используются аддитивные технологии, такие как лазерная стереолитография (SLA), новый метод Self-propagating wave-guide technology. Суть нового метода в том, что полуфабрикат не может пропускать ультрафиолетовое излучение, как готовый полимер. В результате можно быстрее полимеризовать большие области заготовки.

Возможности данного метода исследователи HRL Laboratories показали, напечатав несколько сложных конструкций, с решетчатой и сотовой структурой. По данным публикации, изделия получились высокопрочными, готовые изделия выдерживали большие нагрузки по сравнению с изделиями аналогичных материалов. Полученные разработки могут применяться, при создании реактивных двигателей и производстве микроэлектромеханических систем [8].

Экспериментальная часть. На первом этапе для определения влияния свойств глинистого сырья на возможность их применения в аддитивных технологиях были выбраны глины Санниковского, Намцырского и Кангаласского месторождений Республики Саха (Якутия). Санниковское месторождение расположено в двух километрах к западу от с. Намцы и в 84 км к северу от г. Якутска, Намцырское в 25 км к западу от г. Якутска, а Кангаласское в 46 км к северу от г. Якутска [6]. Глинистое сырье данных месторождений исследовали с целью определения химического состава и физико-механических характеристик. Химический состав глин приведен в табл.1.

Глинистое сырье Санниковского месторождения по химическому составу относится к легкоплавким глинам с высоким содержанием красящих оксидов (оксида железа), Намцырского – легкоплавким со средним содержанием красящих оксидов, а Кангаласского – тугоплавким, беложгущимся глинам.

По данным рентгенофазового анализа глины Санниковского месторождения относятся к каолинит-гидрослюдистым глинам, также присутствуют минералы примеси: кварц и анортит. Намцырская глина имеет сложный полиминеральный состав, обнаружены минералы подгруппы кварца, альбит, ортоклаз, а также каолинит и гидрослюдистые минералы. Кангаласская глина представлена минералами каолинита, кварца, а также галлуазита.

Выявлено, что глины имеют разную гранулометрию, а, следовательно, и такие технологические свойства как пластичность и чувствительность к сушке.

Таблица 1

Химический состав глинистого сырья

Компоненты		Содержание оксидов, мас.%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	п.п.п.	
Санниковское месторождение	61,44	4,24	4,28	2,14	14,40	0,57	2,64	2,11	0,73	8,06	
Намцырское месторождение	63,57	22,38	0,54	0,55	1,70	0,30	2,49	0,95	0,80	5,38	
Кангаласское месторождение	60,28	34,38	0,69	0,49	0,95	_	0,78	0,33	1,49	_	

Определены физические и технологические характеристики исследуемого глинистого сырья, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2 Физические и технологические свойства глинистого сырья

Поморожати	Ед.	Ед. Наименование месторождения глин							
Показатель	изм.	Санниковское	Намцырское	Кангаласское					
Зерновой состав:									
глинистые частицы	%	10,2	13,5	11,3					
пылевидные частицы	%	46,9	46,1	34,4					
песчаные частицы	%	42,9	40,4	54,3					
Число пластичности	%	9,8	15,1	7,1					
Воздушная линейная усадка	%	5,8	6,7	3,7					

Выводы:

- 1. При ежедневно возрастающем мировом интересе к аддитивным технологиям, доля России в мировом рынке аддитивных технологий составляет всего 1%, от лидеров идет большое отставание. Такое отставание идет по всем направлениям, начиная от производства оборудования для аддитивных технологий, до сырьевых материалов
- 2. Применение аддитивным технологиям нашлось и в строительстве, где технология 3D-печати позволяет значительно облегчить ряд про-изводственных этапов. Основной проблемой на данный момент является подбор составов смесей для печатания материалов.
- 3. Преимуществами применения аддитивных технологий в строительстве являются: экономия, за счет уменьшения сроков строительства и человеческих физических ресурсов, экологичности, за счет минимизирования количества вредных отходов от строительства; качество, за счет уменьшения количества просчетов, а также исключения человеческого фактора; возможности.
- 4. Создание керамических трехмерных изделий это пока малораспространенная область аддитивных технологий. Компания Tethon 3D модернизировала процесс струйной 3D-печати использованием пресса и керамических порошков собственного производства. Пресс будет применяться с целью уплотнения свеженанесенных

- слоев. Это поможет улучшить плотность готовых керамических моделей после обжига. Работоспособность данной концепции уже была подтверждена.
- 5. Выбрано глинистое сырье Республики Саха (Якутия) для дальнейшего определения пригодности применения в аддитивных технологиях. Определены химический состав и физикотехнологические свойства, которые показывают различный гранулометрический состав, что является важным для аддитивных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Глазунов В.С., Черепанова М.В. Применение аддитивных технологий в производстве керамических изделий // Вестник ПНИПУ. 2018. №4. С. 174—186.
- 2. Крахматова В.Ю., Захаров А.И. Формирование массы аддитивного производства керамических изделий // Успехи в химии и химической технологии. 2016. № 7. С. 53–54.
- 3. Максимов Н.М. Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы// Аддитивные технологии. 2017. №4. С. 54–62.
- 4. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шаталова С.В., Стариков М.С. Формирование свойств композиций для строительной печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 6–13. DOI: 10.12737/article 59cd0c57ede8c1.83340178.

- 5. Елистраткин М.Ю., Лесовик В.С., Алфимова Н.И., Глаголев Е.С. О развитии технологий строительной печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №5. С. 11-16. DOI: 10.12737/article 5af5a727274397.04099320.
- 6. Борисов Н.Н., Кочнев Н.Н. Объяснительная записка к обзорной карте месторождений строительных материалов Якутской АССР масштаба 1:2500000. В 2-х томах. Том І. М.: Союзгеолфонд, 1988. 421 с.
- 7. Промахов В.В.. Жуков И.А., Ворожцов С.А. Аддитивный способ формования изделий из порошков тугоплавких соединений // Ползуновский вестник. 2016. Т.1. №4. С. 59–63.
- 8. Eckel Z.C., Zhou C., Martin J.H., Jacobsen A.J., Carter W.B., Schaedler T.A., Additivemanufacturing of polymer-derived ceramics// Science. 2016. Vol. 351, Issue 6268. Pp. 58–62. DOI: 10.1126/science.aad2688.
- 9. Zak C. Eckel, Chaoyin Zhou, John H. Martin, Alan J. Jacobsen, William B. Carter and Tobias A. Schaedle. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics // Science. 2016ю Vol. 351, Issue 6268. Pp. 58–62.
- 10.Faes M., Ferraris E., Vleugels J., Vogeler F. Extrusion-based additive manufacturing of ZrO₂ using photoinitiated polymerization // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2016. No. 14. Pp. 28–34.
- 11. Sardarian M., Mirzaee O., Habibolahzaden A. Numerical simulation and experimental investigation on jetting phenomenon in low pressure injection molding (LPIM) of alumina // Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 243. Pp. 374–380.
- 12.Gonzalez J.A., Lin Y., Mireles J., Wicker R.B. Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing

- technology // Original Research Article Ceramics International. 2016. Vol. 42, Issue 9. Pp. 10559–10564.
- 13.Zocca A., Colombo P., Gomes C.M. Additive Manufacturing of Ceramics // Potentialities, and Opportunities. 2015. No. 9. Pp. 637–643.
- 14. Yoo J., Cima M.J., Khanuja S. Structural ceramic components by 3D printing // Solid FreeForm Fabr. Symp. 1995. Pp. 479–488.
- 15.Offering Automated Construction of Various Types of Structures [Электронный ресурс]. URL: http://contourcrafting.com/building-construction/ (Дата обращения: 16.09.2019).
- 16.Объём российского рынка аддитивных технологий в 2018 году может превысить 6 млрд рублей [Электронный ресурс]. URL: https://www.3dpulse.ru/news/analitika/obyom-rossiiskogo-rynka-additivnyh-tehnologii-v-2018-godu-mozhet-prevysit-6-mlrd-rublei/ (Дата обращения: 15.10.2019)
- 17.Первый в Европе жилой дом, напечатанный на 3D-принтере, представили в Ярославле [Электронный ресурс]. URL: https://specavia.pro/articls/pervyj-v-evrope-zhiloj-dom-napechatannyj-na-3d-printere-predstavili-v-yaroslavle/ (Дата обращения: 11.09.2019).
- 18.Аддитивное производство (АП) Additive Manufacturing (АМ) [Электронный ресурс]. URL: http://www.tadviser.ru/index.php/(Additive_Manufacturing) (Дата обращения: 15.10.2019).
- 19. Аддитивные технологии для печати керамики [Электронный ресурс]. URL: http://integralrussia.ru/2016/12/30/additivnye-tehnologii-dlyapechati-keramiki/ (Дата обращения: 17.10.2019).
- 20.Аддитивные технологии в строительстве [Электронный ресурс]. URL: https://3dexpo.ru/ru/article/additivnie-tehnologii-v-stroitelstve-75947 (Дата обращения: 17.10.2019).

Информация об авторах

Егорова Анастасия Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: eg_anastasy2004@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58.

Алексеева Анжелика Николаевна, аспирант кафедры производства строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: vervilangi@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58.

Кириллова Наталья Константиновна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: kirillova_nk@edu.bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в ноябре 2019 г.

© Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д., 2020

¹,*Kirillova N.K., ²Alekseeva A.N., ²Egorova A.D.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov ²North-East Federal University named after M.K. Ammosov *E-mail: kirillova nk@edu.bstu.ru

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION AND IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS

Abstract. Additive technologies that allow creating volume objects of different complexity are becoming popular in different industries. There is an increase in the scale of introduction of 3D printing technologies in the construction industry, including in the production of ceramic products. With the help of modern additive technologies, different models, products and designs are created. They can be complex and can be made from different materials. Experts are wondering what the future holds for additive technologies in construction, as well as in ceramic production, as these technologies can save resources, reduce the time of the technological process and form complex shapes.

The article presents an analytical review of the global application of additive technologies in construction, as well as in the manufacture of ceramic products. The advantages and disadvantages, the possibilities of 3D printing are considered. The creation of ceramic three-dimensional products is still a rare area of additive technologies that requires research. The production of ceramic products, superior to other materials in terms of high temperature strength, hardness, chemical and thermal resistance, has a high potential for the use of additive technologies. The types of construction 3D printers and raw materials for them are analyzed. The results of a study of the properties of clay raw materials of the Sannikovsky, Namtsyrsky and Kangalassky deposits of the Republic of Sakha (Yakutia) are presented.

Keywords: Additive technology, 3D printing, clay raw materials, clay minerals, particle size distribution.

REFERENCES

- 1. Glazunov V.S., Cherepanova M.V. The use of additive technologies in the manufacture of ceramic products [Primenenie additivnyh tekhnologij v proizvodstve keramicheskih izdelij]. Bulletin of PNIPU. 2018. No. 4. Pp. 174–186. (rus)
- 2. Krahmatova V.YU., Zaharov A.I. The formation of the mass of the additive production of ceramic products [Formirovanie massy additivnogo proizvodstva keramicheskih izdelij]. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2016. No. 7. Pp. 53–54. (rus)
- 3. Maksimov N.M. Additive technologies in construction: equipment and materials [Additivnye tekhnologii v stroitel'stve: oborudovanie i materialy]. Additive Manufacturing. 2017. No. 4. Pp. 54–62. (rus)
- 4. Lesovik V.S., Elistratkin M.YU., Glagolev E.S., SHatalova S.V., Starikov M.S. Formation of properties of compositions for building printing [Formirovanie svojstv kompozicij dlya stroitel'noj pechati]. Bulletin BGTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 6–13. doi: 10.12737/article 59cd0c57ede8c1.83340178. (rus)
- 5. Elistratkin M.YU., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Glagolev E.S. On the development of building printing technologies [O razvitii tekhnologij stroitel'noj pechati]. Bulletin BGTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 5. Pp. 11–16. doi: 10.12737/article¬ 5af5a727274397.04099320. (rus)
- 6. Borisov N.N., Kochnev N.N. Explanatory note to the overview map of deposits of building ma-

- terials of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic on a scale of 1: 2500000 [Ob"yasnitel'naya zapiska k obzornoj karte mestorozhdenij stroitel'nyh materialov Yakutskoj ASSR masshtaba 1:2500000]. 1988. Vol. 1. 421 p. (rus)
- 7. Promahov V.V., Zhukov I.A., Vorozhcov S.A. The additive method of molding products from powders of refractory compounds [Additivnyj sposob formovaniya izdelij iz poroshkov tugoplavkih soedinenij] Polzunovskij bulletin. 2016. Vol.1. No. 4. Pp. 59–63. (rus)
- 8. Eckel Z.C., Zhou C., Martin J.H., Jacobsen A.J., Carter W.B., Schaedler T.A., Additivemanufacturing of polymer-derived ceramics. Science. 2016. Vol. 351. Issue. 6268. Pp. 58–62. doi: 10.1126/science.aad2688.
- 9. Zak C. Eckel, Chaoyin Zhou, John H. Martin, Alan J. Jacobsen, William B. Carter and Tobias A. Schaedle. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics. Science. 2016: Vol. 351. Issue. 6268. Pp. 58–62.
- 10.Faes M., Ferraris E., Vleugels J., Vogeler F. Extrusion-based additive manufacturing of ZrO₂ using photoinitiated polymerization. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2016. No. 14. Pp. 28–34.
- 11. Sardarian M., Mirzaee O., Habibolahzaden A. Numerical simulation and experimental investigation on jetting phenomenon in low pressure injection molding (LPIM) of alumina. Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 243. Pp. 374–380.

- 12.Gonzalez J.A., Lin Y., Mireles J., Wicker R.B. Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. Original Research Article Ceramics International. 2016. Vol. 42. Issue. 9. Pp. 10559–10564.
- 13.Zocca A., Colombo P., Gomes C.M. Additive Manufacturing of Ceramics. Potentialities, and Opportunities. 2015. No. 9. Pp. 637–643.
- 14. Yoo J., Cima M.J., Khanuja S. Structural ceramic components by 3D printing. Solid FreeForm Fabr. Symp. 1995. Pp. 479-488.
- 15.Offering Automated Construction of Various Types of Structures. URL: http://contourcrafting.com/building-construction/ (date of treatment: 16.09.2019).
- 16. The volume of the Russian additive technology market in 2018 may exceed 6 billion rubles.

- URL: https://www.3dpulse.ru/news/analitika/obyom-rossiiskogo-rynka-additivnyhtehnologii-v-2018-godu-mozhet-prevysit-6-mlrd-rublei/ (date of treatment: 15.10.2019)
- 17. The first 3D-printed residential building in Europe presented in Yaroslavl. URL: https://specavia.pro/articls/pervyj-v-evrope-zhiloj-domnapechatannyj-na-3d-printere-predstavili-v-yaroslavle/ (date of treatment: 11.09.2019).
- 18.Additive Manufacturing (AM). URL: http://www.tadviser.ru/index.php/(Additive_Manufacturing) (date of treatment: 15.10.2019).
- 19.Additive technology for ceramic printing. URL: http://integral-russia.ru/2016/12/30/additivnye-tehnologii-dlya-pechati-keramiki/ (date of treatment: 17.10.2019).
- 20. Additive technologies in construction. URL: https://3d-expo.ru/ru/article/additivnie-tehnologii-v-stroitelstve-75947 (date of treatment: 17.10.2019).

Information about the authors

Egorova, Anastasiya D. PhD, Assistant professor. E-mail: eg_anastasy2004@mail.ru. North-East Federal University named after M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinsky str., 58.

Alekseeva, Anjelika N. Postgraduate student. E-mail: vervilangi@mail.ru. North-East Federal University named after M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinsky str., 58.

Kirillova, **Nataliya K.** Postgraduate student. E-mail: natakir91@icloud.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in November 2019

Для цитирования:

Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 134—141. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-134-141

For citation:

Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. Application of additive technologies in construction and in the production of ceramic products. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 134–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-134-141

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-142-148

*Романцов Р.С., Юракова Т.Г.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова *E-mail: romantsovrrs@mail.ru

МЕТОД ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В ПОВЫШЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. На сегодняшний день повышение конкурентоспособности продукции и повышение ее качества стали синонимичными понятиями, а поиск способов достижения этих целей стал ключевым. В данной статье рассмотрена концепция конкуренции и предложен один из эффективных путей достижения конкурентоспособной продукции в машиностроительной отрасли — квалиметрический метод экспертных оценок. Данный метод является эффективным, универсальным и удобным при решении различных задач. Применение метода экспертных оценок позволит предприятию постоянно совершенствовать форму своих товаров, определять необходимые показатели качества, повысить материальную заинтересованность работников, улучшить условия труда на производстве и многое другое. Тем самым метод становится эффективным «средством», позволяющим поддерживать устойчивое положение предприятия на рынке и обеспечивать один из ключевых принципов СМК, ТQМ - ориентация на потребителя, включающая определение возможных причин брака продукции и проведение маркетинговых исследований с целью определения потребностей клиентов.

Ключевые слова: конкурентоспособность, машиностроение, квалиметрия, качество, экспертный метод.

Введение. «Никто не помнит имени того, кто пришел к финишу вторым» (Чарлз Шульц). Высокая конкуренция на мировом рынке машиностроительной продукции обуславливает жесткие требования к ее качеству. Существование нескольких производителей одного вида продукции создает конкуренцию. Это вынуждает продавцов в полной мере удовлетворять потребности покупателя, чтобы сделать его своим постоянным клиентом. Конкуренция стимулирует рынок, увеличивает производство, снижать издержки, является необходимым условием быстрой реакции производителей на меняющиеся требования потребителей на всех этапах производства, а также побуждает использовать более эффективные методы при производстве, что, в конечном счете, создает среду, содействующую техническому и социальному прогрессу. Именно поэтому, на современном этапе развития рыночной экономики, поиск путей решения проблем, связанных с повышением конкурентоспособности являются актуальным [1–2].

В настоящее время существует немало методов, инструментов и концепций для оценки имеющегося конкурентного потенциала предприятия. Однако, из-за недостаточной квалификации менеджеров, отсутствия понимания специфики работы предприятия, основанной на принципе «ориентация на потребителя», неумения разрабатывать механизмы и применять инструменты для

повышения конкурентного потенциала, лишь некоторая часть этих инструментов нашло свое применение. Эта сложившаяся ситуация на практике и не позволяет развивать конкурентный потенциал, который показывает наличие у предприятия способности для создания долгосрочных преимуществ перед другими производителями. Что позволяет в полной мере обеспечить конкурентную стратегию, увеличить долю рынка, а также создать такие условия, при которых компания улучшит свои позиции [3].

Производство качественной продукции является основополагающим принципом достижения конкурентоспособности, а одним из эффективных путей его обеспечения является совершенствование систем качества (система менеджмента качества (СМК), всеобщее управление качеством (TQM)) [4]. Наиболее важным требованием этих стандартов является предоставление производителем доказательств о его способности обеспечивать необходимый уровень качества выпускаемой продукции и постоянного его улучшения. Подтверждением этого могут служить: последовательное использование инноваций, поиск новых, более совершенных форм промышленных товаров, определение необходимых показателей качества, повышение материальной заинтересованности работников и улучшение условий труда на производстве, и многое другое. Так же, одним из ключевых принципов СМК, TQM позволяющим обеспечивать устойчивое положение предприятия на рынке является его ориентация на потребителя, включающая проведение маркетинговых исследований с целью определения потребностей клиентов. Решить все эти задачи способна многочисленная номенклатура квалиметрических методов и инструментов [5–8].

Методы и инструменты. К простым квалиметрическим инструментам можно отнести: контрольный листок, гистограмму, диаграмму разброса, диаграмму Парето, стратификацию, диаграмму Исикавы, контрольные карты Шухарта. Данные инструменты являются понятными, наглядными и эффективными [9]. Так же существуют и другие методы, которые предназначены для решения как квалиметрических задач, так и тех, которые по существу адаптируются к качественным задачам количественной оценки. Поскольку здесь невозможно рассмотреть все, стоит разделить их на группы и выделить ключевой [10].

Экспертные методы оценки качества – это методы, с помощью которых знания экспертов используются для определения различных числовых характеристик и решения необходимых задач. Особенностью этих методов является то, что они ориентированы на человека (эксперта/потребителя) как непосредственного измерителя качества в системе оценки. Метод имеет различные разновидности и формы и используется в ситуациях, когда для решения задач по оценке уровня качества невозможно или затруднительно использовать более объективные методы, например, измерительный или расчетный. Наиболее известными примерами метода экспертных оценок являются: метод Дельфи, мозговой штурм, Метод «635 и аналитический метод.

Non-expert (также известные как аналитические методы) - методы, которые обходятся без экспертов в поиске этих значений. Однако, даже там эксперты все же нужны, например, их услуги часто могут быть необходимы для выполнения одной из операций оценки качества, получения дерева свойств.

Гибридные методы - методы, в которых значения некоторой части числовых характеристик объекта определяются экспертным методом, а остальные - не экспертными методами. При принятии решения о том, какой метод использовать в конкретном случае при решении проблемы, следует учитывать его сущность, специфику, а также плюсы и минусы. В российской и международной практике оценки качества гибридные методы используются более чем в 90 % всех случаев. Поэтому акцент этой статьи будет именно на экспертный метод, как основу большинства применяемых методов [11].

В данном методе суждение предоставляется на основе определенного набора критериев и/или экспертных знаний, которые были приобретены ранее в определенной области знаний, применения или производства продукта, конкретной дисциплине, отрасли и т.д. Такой опыт может быть предоставлен любой группой или лицом, имеющим специальное образование, знания, навыки, опыт или подготовку. Эта база знаний может быть предоставлена одним членом проектной группы или несколькими участниками проектной группы, а также руководителем группы. Однако, как правило, экспертное суждение требует экспертных знаний, которые не присутствуют в команде проекта и, поэтому необходимо привлекать лиц с конкретным соответствующим набором навыков или базой знаний, необходимой для решения проблемы [12-15].

Такой опыт может быть предоставлен любой группой или отдельным лицом (экспертом), обладающим специальными знаниями или подготовкой, и доступен из многих источников, включая:

- подразделения внутри организации;
- консультанты;
- заинтересованные стороны, включая клиентов или спонсоров;
- профессиональные и технические ассоциации;
 - и др.

Основная часть. Перейдем к непосредственному применению метода экспертных оценок в машиностроительном производстве. Используем данный метод для определения причин выхода из строя одного из узлов агрегата. Так, практически любой сложный механизм имеет движущиеся части, узлы, оснащенные подшипниками. При правильном обслуживании и эксплуатации они позволяют механизму работать с очень небольшим количеством проблем/отказов. Когда подшипники выходят из строя, вместе с ним выходит из строя и весь механизм. Статистика показывает, что отказ работы подшипников составляет более 50 % всех поломок электродвигателей. Большинство из нас знакомы с общими причинами отказа подшипников [16]. Они включают в себя:

- несоосность;
- неправильный монтаж;
- загрязненная или неправильная смазка;
- воздействие высоких температур;
- усталость подшипника;
- неправильные методы хранения.

Это в среднем первые причины, которые нужно искать, при возникновении проблем с подшипниками. Существуют и другие проблемы, которые возникают и приводят к преждевременному их отказу в определенном, уникальном для

конкретного предприятия месте, участке. Применение данного метода особенно актуально при анализе именно таких единичных, локализованных, имеющих место быть только в этих условиях или специфике производства. Определение причин, из-за которых возникают неисправности, позволит их предотвратить и, тем самым, позволит производителю создавать качественную продукцию. Так на предприятие по производству машиностроительной продукции поступила рекламация по причине быстрого выхода из строя электродвигателя, вследствие разрушения подшипника качения в одном из его узлов. Для решения данной проблемы нами было принято решение об использовании экспертного метода [17–18].

Осуществляемый квалиметрический анализ включает в себя следующие этапы:

- 1. Составление схемы существующего технологического процесса установки и работы анализируемого объекта (установка подшипника, условия работы, обслуживание и др.).
- 2. Выбор экспертов из числа сотрудников или приглашение извне (происходит путем назначе-

ния, рекомендаций и др.), их опрос с целью выяснения реальных или возможных причин быстрого выхода из строя подшипника качения.

- 3. Составление сводного перечня причин и ранжирование их по значимости.
 - 4. Статистическая обработка данных:
- построение диаграммы размахов (коробчатая диаграмма);
- рангов и сумм рангов, присвоенных каждой причине;
- определение наиболее значимого показателя;
- определение коэффициента конкордации Кендалла и уровня значимости.

Корректирующие мероприятия, направленные на улучшение работы подшипника:

- опрос экспертов о путях устранения неблагоприятных основных факторов из числа выделенных;
- принятие мер по повышению качества работы.
- Результаты проведенного опроса экспертов приведены в таблице 1.

Таблица l Результаты опроса экспертов по причинам выхода из строя подшипника электродвигателя

№ эксперта / наименование фактора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Перегрузка	8	9	8	7	8	10	10	10	9	8
Неправильная сборка	9	10	10	9	7	9	9	8	7	9
Грязь	10	8	9	10	10	8	8	9	10	10
Перекос	7	6	5	8	9	7	6	7	8	7
Недостаточная смазка	5	7	7	6	5	5	7	6	5	6
Коррозия	4	5	6	5	6	6	5	4	6	5
Неправильная цапфа	6	4	3	4	4	3	4	5	3	4
другое	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3

Анализ экспертной оценки произведем с помощью статистического и аналитического программного обеспечения «STATISTICA». Данная

программа является одной из широко используемых статистических программ для поиска закономерностей, прогнозирования, классификации и визуализации данных.

Таблица 2

Результаты анализа экспертной оценки

Переменные	df = 7) = 54,533	Ранговый дисперсионный анализ Фридмана и конкордация (N = 10, df = 7) = $54,53333$ p = $0,00001$. Коэфф. конкордации = $0,77905$ Средний ранг r = $0,75450$						
	Сред. ранг	Сумма рангов	Среднее	Станд. откл.				
Грязь	7,600	76,000	9,600	0,699206				
Перегрузка	6,100	61,000	8,100	1,197219				
Недостаточная смазка	6,000	60,000	8,000	1,763834				
Перекос	5,400	54,000	7,4000	1,349897				
Неправильная сборка узла	3,900	39,000	5,9000	0,875595				
Коррозия	3,700	37,000	5,7000	1,251666				
Дефект цапфы	2,000	20,000	4,0000	0,942809				
другое	1,300	13,000	3,3000	0,483046				

Полученный коэффициент конкордации Кендалла 0,78> 0, 7 означает, что согласованность мнений экспертов высокая. Уровень значимости р

= 0,00001<0,05, позволяет судить о том, что гипотезу об однородности распределения можно отвергнуть.

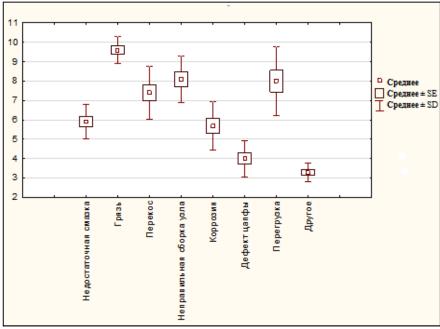


Рис.1. Диаграмма размахов результатов экспертной оценки

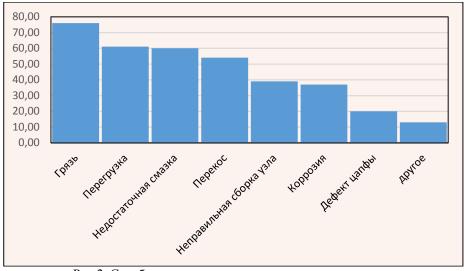


Рис.2. Столбчатая диаграмма рангов экспертных оценок

Выводы. Проанализировав данные полученные экспертным методом, можно сделать вывод о том, что причиной быстрого выхода из строя подшипники на данном предприятии является их засорение. На основании полученных данных в дальнейшем необходимо введение корректирующих действий, устраняющих причины появления брака. Для нашего случая устранением данного вида причин выхода из строя подшипника является пересмотр конструкции электродвигателя с ориентацией на условия эксплуатации. Возможна установка дополнительного манжетного уплотнения или другой дополнительной защиты от грязи и пыли. Данный вид анализа представлен в наиболее простой и понятной форме [19-20].

Подводя итог можно сказать, что в современном мире организация производства качественной продукции не возможна без ее квалиметрической оценки. А методы и инструменты

квалиметрии стали одним из обязательных атрибутов рыночных отношений. С ее помощью у производителя появляется возможность определять оптимальные показатели качества, находить причины брака в технологическом процессе, прогнозировать потребности потребителя, рассчитывать конкурентоспособную цену, расширять рынок сбыта и много другое.

Таким образом, внедрение квалиметрических методов, а в частности экспертного метода в комплексе со специализированным программным обеспечением позволит предприятию получить устойчивое конкурентное преимущество на рынке и завоевать доверие потребителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев А.А. Оценка конкурентоспособности продукции: методологический аспект // Вест-

ник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2017. Т.9. № 2. С. 83–89.

- 2. Еремеева Н.В. Конкурентоспособность товаров и услуг: учебник и практикум для академического бакалавриата / Н.В. Еремеева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт. 2017. 193 с.
- 3. Мокроносов А.Г., Маврина И.Н. Конкуренция и конкурентоспособность: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2014. 194 с.
- 4. Портер М. Международная конкуренция: конкурентные преимущества стран. М.: Альпина Паблишер, 2016. 947 с.
- 5. Samarina E.A., Petrova A.D., Blazhen-kova N.M. Development of competitiveness of enterprise structures under the conditions of accession of the Russian federation to the WTO // Journal of Advanced Research in Law and Economics. 2015. T. 6. № 1. Pp. 198–207.
- 6. Юракова Т.Г., Черноситова Е.С., Левицкая К.М. Актуальные вопросы обеспечения качества стали как основного материала для производства продукции машиностроения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №6. С. 207–212.
- 7. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). М.: Экономика, 1982. 256 с.
- 8. Барвинок В.А. Менеджмент качества в машиностроении: системы, методы, инструменты: учеб. Пособие. М.: Наука и технологии, 2008. 384 с.
- 9. Романцов Р.С., Черноситова Е.С. Диаграмма Парето как инструмент повышения качества и совершенствования технологического процесса производства цанги зажимной // В сб.: Качество продукции: контроль, управление, повышение: сб. науч. трудов по итогам 4-й Международной молодежной научно-практической конференции. Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2017, том 2, 228 с.

- 10. Кане М.М., Иванов Б.В. Системы, методы и инструменты менеджмента качества. М: АСВ. 2008. С. 23. С. 115–139.
- 11. Андрианов, Ю.М. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении. Л.: Машиностроение, 1990. 216 с.
- 12. Гатилова Е.С., Луценко О.В. Роль квалиметрии в управления качеством // В сб.: Молодежь и научно-технический прогресс: сб. X междунар. науч.-практ. конф. Губкин, 2017, том 3, с. 67-69.
- 13.Shi X., Zhu K., Wang W., Fan L., Gao J. A thermal characteristic analytic model considering cutting fluid thermal effect for gear grinding machine under load // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018. Vol. 99. Is. 5-8. Pp. 1755–1769.
- 14. Чекмарёв А.Н. Квалиметрия и управление качеством. Ч.1. Квалиметрия: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ. 2010. 172 с.
- 15.Хвастунов, Р.М. Квалиметрия в машиностроении: учебник. М.: Изд-во «Экзамен». 2009.285 с.
- 16. Ходыревская С. В. Квалиметрия и нормирование показателей качества: учебнометодическое пособие. Курск: ЮЗГУ. 2010. 246 с.
- 17. Богодухов С.И. Технологические процессы машиностроительного и ремонтного производства. Старый Оскол: ТНТ. 2015. 464 с.
- 18. Чернышева Е.В., Серых И.Р. Основы научных исследований, планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ. 2014. 103 с.
- 19.Справочник технолога—машиностроителя: в 2-х т. Т.2. Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., исправл. М.: Машиностроение. 2003. № 1. 944 с.
- 20.Putz M., Richter C.,Regel J.,Bräunig M. Industrial consideration of thermal issues in machine tools // Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Is. 6. Pp. 723–736.

Информация об авторах

Романцов Роман Сергеевич, магистрант кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: romantsovrrs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Юракова Татьяна Генадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: tatjana.2006@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2019 г.

© Романцов Р.С., Юракова Т.Г., 2020

*Romantsov R.S., Yurakova T.G.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov E-mail: romantsovrrs@mail.ru

EXPERT ASSESSMENT METHOD IN INCREASING COMPETITIVENESS OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS

Abstract. No one remembers the name of the one who came to the finish line second. In modern realities, increasing the competitiveness of products and improving their quality are synonymous, and the search for ways to achieve these goals has become key. This article discusses the concepts of competition and presents one of the effective ways to achieve competitive products in the engineering industry – the qualimetric method of expert assessments. This method is effective, universal and convenient for solving various problems. The application of the method of expert assessments allows the company to constantly improve the shape of its products, determine the necessary quality indicators, increase the material interest of workers, improve working conditions in the workplace and much more. Thus, the method becomes an effective "tool" that allows to maintain a stable position of the enterprise on the market and provide one of the key principles of QMS, TQM – customer orientation, which includes identifying possible causes of product defects and conducting market research to determine customer needs.

Keywords: competition, qualimetry, quality, expert method.

REFERENCES

- 1. Isaev A.A. Assessment of product competitiveness: methodological aspect [Ocenka konkurentosposobnosti produkcii: metodologicheskij aspekt]. Bulletin of the Vladivostok State University of Economics and Service. 2017. Vol. 9. No. 2. Pp. 83–89. (rus)
- 2. Eremeeva N.V. Competitiveness of goods and services: textbook and workshop for academic undergraduate [Konkurentosposobnost` tovarov i uslug: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata]. N.V. Eremeeva. 2nd ed., Rev. and add. M.: Yurayt Publishing House, 2017. 193 p. (rus)
- 3. Mokronosov A.G., Mavrina I.N. Competition and competitiveness: a tutorial [Konkurenciya i konkurentosposobnost:ucheb. Posobie]. Ekaterinburg: Publishing house Ural University press.2014.194p. (rus)
- 4. Porter M. International competition: competitive advantages of countries. M.: Alpina Publisher. 2016. 947 p. (rus)
- 5. Samarina E.A., Petrova A.D., Blazhen-kova N.M. Development of competitiveness of enterprise structures under the conditions of accession of the Russian federation to the WTO. Journal of Advanced Research in Law and Economics. 2015. Vol. 6. No. 1. Pp. 198–207.
- 6. Yurakova T.G., Chernositova E.S., Levitskaya K.M. Actual issues of ensuring the quality of steel as the main material for the production of engineering products [Aktual'ny'e voprosy' obespecheniya kachestva stali kak osnovnogo materiala dlya proizvodstva produkcii mashinostroeniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 6. Pp. 207–212. (rus)

- 7. Azgaldov G.G. The theory and practice of assessing the quality of goods (fundamentals of qualimetry) [Teoriya i praktika ocenki kachestva tovarov (osnovy` kvalimetrii)]. M.: Economics. 1982. 256p.
- 8. Periwinkle V.A. Quality management in mechanical engineering: systems, methods, tools: textbook [Menedzhment kachestva v mashinostroenii: sistemy', metody', instrumenty': ucheb. Posobie]. M.: Science and Technology, 2008. 384 p. (rus)
- 9. Romantsov R.S., Chernositova E.S. Pareto diagram as a tool for improving the quality and improving the technological process of production of the collets [Diagramma Pareto kak instrument povy'sheniya kachestva i sovershenstvovaniya texnologicheskogo processa proizvod-stva czangi zazhimnoj] V sb.: Kachestvo produkcii: kontrol', upravlenie, po-vy'shenie: sb. nauch. trudov po itogam 4-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoprakticheskoj konferencii. Kursk: Iz-vo ZAO «Universitetskaya kniga». 2017. Vol. 2, 228 p. (rus)
- 10. Kane M.M., Ivanov B.V. Systems, methods and tools of quality management [Sistemy`, metody` i instrumenty` menedzhmenta kachestva]. M: DIA. 2008. 115–139 p. (rus)
- 11. Andrianov Yu.M. Qualimetry in instrument making and mechanical engineering [Kvalimetriya v priborostroenii i mashinostroenii]. L.: Engineering, 1990. 216 p. (rus)
- 12. Gatilova E.S., Lutsenko O.V. The role of qualimetry in quality management [Rol` kvalimetrii v upravleniya kachestvom]. V sb.: Molodezh` i nauchno-texnicheskij progress: sb. X mezhdunar. nauch. prakt. konf. Gubkin. 2017. Vol 3. Pp. 67–69. (rus)
- 13. Shi X., Zhu K., Wang W., Fan L., Gao J. A thermal characteristic analytic model considering cutting fluid thermal effect for gear grinding machine

under load. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018. Vol. 99. Is. 5-8. Pp. 1755–1769.

- 14. Chekmarev A.N. Qualimetry and quality management. Part 1. Qualimetry: textbook. Allowance [Kvalimetriya i upravlenie kachestvom. Ch.1. Kvalimetriya: ucheb. Posobie]. Samara: Publishing House of SSAU, 2010.172 p. (rus)
- 15. Khvastunov R.M. Qualimetry in mechanical engineering: a textbook [Kvalimetriya v mashinostroenii: uchebnik]. M.: Publishing house "Examination", 2009.285 p. (rus)
- 16. Khodyrevskaya S.V. Qualimetry and rationing of quality indicators: a training manual [Kvalimetriya i normirovanie pokazatelej kachestva: uchebnometodicheskoe posobie].Kursk: South-Western State University. 2010. 246 p. (rus)
- 17. Bogodukhov S.I. Technological processes of engineering and repair production [Texnolog-

- icheskie processy` mashinostroitel`nogo i remontnogo proizvodstva]. Stary Oskol: TNT, 2015.446 p. (rus)
- 18. Chernysheva E.V., Serykh I.R. Fundamentals of scientific research, planning and organization of the experiment: a training manual. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2014.103 p. (rus)
- 19. Reference technologist mechanical engineer: in 2 tons [Spravochnik tehnologa–mashinostroitelya: v 2-h t]. V.2. Ed. A.M. Dalsky, A.G. Kosilov, R.K. Meshcheryakova. 5th ed., Amended M.: Mechanical Engineering. 2003. No. 1. 944 p. (rus)
- 20. Putz M., Richter C., Regel J., Bräunig M. Industrial consideration of thermal issues in machine tools. Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Is. 6. Pp. 723–736.

Information about the authors

Romantsov, Roman S. Master student. E-mail: romantsovrrs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Yurakova, **Tat'yana G.** PhD, Assistant professor. E-mail: tatjana.2006@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Романцов Р.С., Юракова Т.Г. Метод экспертных оценок в повышении конкурентоспособности машиностроительной продукции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 142–148. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-142-148

For citation:

Romantsov R.S., Yurakova T.G. Expert assessment method in increasing competitiveness of machine-building products. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 142–148. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-142-148

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-149-163

*Поляков А.Н., Никитина И.П.

Оренбургский государственный университет *E-mail: anp_temos@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МОДАЛЬНОГО ПОДХОДА К ПОСТРОЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКОВ, РАБОТАЮЩИХ В СЛОЖНОМ РЕЖИМЕ

Аннотация. В работе представлена методика построения имитационных моделей применительно к тепловым процессам станков в Simulink. В работе рассмотрены три способа построения имитационных моделей в Simulink с использованием: аналитического решения уравнения теплопроводности, инструментов решения дифференциальных уравнений, аппарата передаточных функций. Эти способы моделирования представлены при решении двух типовых задач: построение тепловой характеристики станка при нулевых и ненулевых начальных условиях. Проведенные исследования показали, что Simulink позволяет строить модели с несложной логикой, но достоинством построенных S-моделей является их наглядность и структурированность. При моделировании циклограмм работы станка способ построения имитационных моделей, основанный на использовании аналитических решений уравнения теплопроводности, позволяет строить наиболее компактные модели. Особенностью построения инвариантных моделей в Simulink является использование т-файла Matlab, в котором генерируются параметры, используемые в S-модели.

Ключевые слова. тепловые характеристики станка, тепловая погрешность, экспериментальный модальный анализ, имитационное моделирование.

Введение. Стремительное развитие информационно-коммуникационных технологий приводит к радикальным изменениям в промышленности. Сегодня мировые эксперты уже не только говорят об Индустрии 4.0, но и выстраивают концепцию будущего общества Общество 5.0 [1, 2]. Общество 5.0 – это общество киберфизических технологий, когда собираемая в процессе производства информация размещается в киберпространстве. Там происходит его обработка, находятся оптимальные решения и переправляются обратно в физическое пространство. При этом, наряду с 3D-принтерами и робототехникой, значительное место в физическом пространстве эксперты по-прежнему отводят высокотехнологичным станкам с числовым программным управлением (ЧПУ). Важнейшим фактором принятия решений в киберпространстве являются математические модели процессов, протекающих в станках

Несмотря на серьезные технические и технологические решения, реализуемые в современных станках с ЧПУ, проблема их теплоустойчивости остается не решенной и сегодня [3]. Этому свидетельствуют многочисленные публикации в изданиях, представленных в международных базах цитирования. В качестве примера ниже представлен краткий обзор нескольких работ 2019 года, дающих представление о существующей проблеме и некоторых направлениях ее решения.

В работе [4] представлено исследование термо-механической связи в приводе подачи шпиндельной головки, возникающей при фрезеровании. Стратегическая цель исследования – повысить точность прогнозирования, возникающих

в приводе погрешностей. Это, как считают авторы, позволит повысить точность компенсации погрешностей. Стендовые испытания показали, что в начальных деформациях винта шариковинтовой передачи преобладающее влияние оказывают силы резания. По мере прогревания привода влияние тепловых процессов на деформации по оси постепенно начинают превосходить влияние сил резания. По оси Y влияние тепловых процессов — минимально. А по оси Z, наоборот, минимально влияние сил резания.

В работе [5] исследовались тепловые смещения шпиндельного узла, обусловленные как флуктуацией температуры окружающей среды, так и изменением мощности внутренних источников тепла, являющихся основным фактором, ограничивающим точность станка. Экспериментальные исследования проводились на токарном центре с ЧПУ СК50 (производитель STMSI, КНР). Тепловые смещения шпиндельного узла фиксировались с использованием пяти вихретоковых датчиков. В ходе натурных экспериментов шпиндель станка вращался с частотами 1500 и 2000 об/мин. Максимальная избыточная температура фиксировалась на уровне не выше $18^{\circ}C$, при этом максимальные тепловые смещения составляли около 55 мкм. По данным авторов, им удалось добиться устойчивости прогнозной модели, построенной на основе многоцелевого генетического алгоритма. Результаты проверочных экспериментов показали, что при наличии существенной флуктуации температуры окружающей среды и различных режимов работы станка, точность прогнозной модели сохранялась на уровне не ниже 74%.

В работе [6] рассмотрено совместное использование физически обоснованной модели (physically based model) станка и применяемый часто в бизнес-среде подход к построению моделей - DDM (Data Driven Model) или модель, управляемая данными. Апробация предложенных решений по компенсации температурной погрешности станка экспериментально проведена вертикальном обрабатывающем центре TC500R. Ввиду симметричности конструкции станка вертикальной компоновки исследовались только тепловые смещения по оси Y, по оси Xсмещения не учитывались. При этом тепловой дрейф по оси У при скоростях перемещения 10 м/мин в течение почти двух часов составил 55 мкм. Даже при небольшой частоте вращения шпинделя равной 1000 об/мин перемещения по оси У составили чуть менее 20 мкм после четырех часов работы станка.

В работе [7] представлен новый метод измерения и моделирования тепловой погрешности шпинделя станка с ЧПУ. В статье рассмотрен метод измерения тепловых деформаций шпинделя по пяти точкам. Предлагаемая модель тепловой погрешности шпинделя построена на основе метода опорных векторов с использованием метода взвешенных наименьших квадратов. Предложено использовать метод программирования экспрессии генов (GEP) в качестве алгоритма оптимизации параметров, используемых при построении модели тепловых деформаций шпинделя. Погрешность прогнозирования тепловых смещений шпинделя в осевом направлении составила менее одного микрометра.

В работе [8] рассмотрено формирование погрешностей обработки в тяжелом портальном шлифовальном станке. Было показано, что для таких станков, наряду с прогибами, обусловленными собственным весом, актуальны и прогибы, вызываемые тепловыми деформациями ввиду возникающей разницы температур. Экспериментально было получено, что при разнице температур в поперечине 5,3 °C и 7,5 °C максимальные величины прогибов по оси Z составили 140 и 190 мкм, соответственно.

В работе [9] предлагается новый метод компенсации теплового смещения шпинделя станка с использованием метода глубокого обучения. В качестве объекта исследования использован токарный центр.

В работе [10] в качестве определяющего фактора тепловых погрешностей в токарных станках рассмотрены погрешности в шариковой винтовой передаче привода подачи. Предложен

метод адаптивного прогнозирования тепловых ошибок в шариковой винтовой передаче привода на основе новой адаптивной модели движущейся тепловой искусственной нейронной сети. Из натурных экспериментов было установлено, что при уровне избыточных температур не более 3,5 °C тепловые погрешности в шариковой винтовой передачи составили около 17,5 мкм.

В прецизионных шлифовальных станках, оснащенных системами компенсации тепловой погрешности, в недостаточной степени учитывают тепловой эффект от применяемой смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что неизбежно приводит к потере точности обработки. Так в работе [11] было экспериментально исследовано влияние СОЖ на тепловые характеристики червячной передачи прецизионного шлифовального станка. Эксперименты проводились при трех вариантах работы станка: без нагрузки с охлаждающей жидкостью, без нагрузки с нагреваемой охлаждающей жидкостью и под нагрузкой. Это позволило разработать модель компенсации тепловой погрешности обработки в реальном масштабе и подтвердить ее на основе экспериментальных данных, учитывающих тепловое воздействие СОЖ.

В работе [12] авторами предложено создавать интеллектуальные станки, способные компенсировать в режиме реального времени возникающие по всем осям тепловые погрешности.

Таким образом, даже неполный обзор проведенных в последнее время исследований различными авторами показывает актуальность тепловых проблем в достижении точности обработки и сложность алгоритмов, используемых в тепловом моделировании станков.

Модальный анализ. Сегодня наблюдается многообразие подходов, методов и алгоритмов, используемых в тепловом моделировании станков и системах компенсации их тепловой погрешности. Вместе с тем в мировой практике для решения задач, связанных с физическими процессами в станках, продолжает использоваться модальный подход [13, 14, 21].

В статье [13] тепловой модальный анализ был использован для разработки новой стратегии размещения датчиков температуры на станке. Пространственное размещение датчиков температуры на станке определяет информативность формируемого при работе станка температурного поля. А наличие однозначной связи между температурой и тепловыми смещениями элементов конструкции станка определяет точность оценки модели тепловой погрешности.

В работе [14] представлен новый метод быстрой идентификации температурной характе-

ристики в выделенной точке станка. Метод базируется на операционном модальном анализе. При этом температурная характеристика в выделенной точке станка, время температурной стабилизации и уровень установившихся температур могут быть вычислены на основе измеренных данных за короткое время прогрева станка. Основное преимущество такого подхода заключается в прогнозировании температурной характеристики в выбранной точке станка в течение короткого периода времени равного не более 30 минут вместо трех или шестичасовых испытаний при традиционном подходе.

Классический модальный подход связан с двойным модальным преобразованием [15–17]. Прямое модальное преобразование позволяет перейти от системы связных дифференциальных уравнений к системе несвязных дифференциальных уравнений. При этом уравнение имеет простой вид и методы его решения известны. Получив решение для каждой модальной координаты и используя модальное преобразование уже в качестве обратного, получают решение для исходной связанной системы. В этом и заключаются теоретические основы модального подхода, используемого для решения сложной технической системы, описываемой системой дифференциальных уравнений.

При описании тепловых процессов любой технической системы используют уравнение теплопроводности, которое для любой одной модальной координаты u_k будет иметь вид [16, 17]

$$\frac{du_k(\mathbf{0})}{dt} = \frac{1}{T_k} \left(T_k \times q_k - u_k \right) \tag{1}$$

где $T_k - k$ -я тепловая постоянная времени, мин; $q_k - k$ -я модальная тепловая нагрузка, безразмерная величина; k — номер температурной моды или модальной координаты.

Решение уравнения (1) для ненулевых начальных условий имеет вид

$$u_{k}(0) = T_{k} \cdot q_{k} \cdot (-e^{-t/T_{k}}) + u_{0k} \cdot e^{-t/T_{k}}$$
 (2)

где u_{0k} – начальный модальный уровень.

С учетом модального преобразования [1, 2]

$$\{T\} = [\Phi]\{u\} \tag{3}$$

где $[\Phi] = [\{\varphi_1\}, \{\varphi_2\}, ..., \{\varphi_k\}, ..., \{\varphi_n\}];$

В физических координатах уравнение (2) в некоторой фиксированной точке i несущей системы станка (HCC) примет вид

$$y_{i}(\mathbf{y}) = \sum_{k=1}^{n} \left(Y_{ik} \cdot (-e^{-t/T_{k}}) + y_{0ik} \cdot e^{-t/T_{k}} \right)$$
(4)

где $Y_{ik} = \varphi_{ik} \cdot T_k \cdot q_{ik}$; $y_{0ik} = \varphi_{ik} \cdot u_k$; $\varphi_k = \{\varphi_{1k}, \varphi_{2k}, ..., \varphi_{nk}, \}^T - k$ -й собственный вектор, найденный из решения задачи на собственные значения [18]; n — число температурных мод или модальных координат; $Y_{ik} - k$ -я компонента амплитуды искомой функции $y_i(0)$; $y_{0ik} - k$ -я компонента начального уровня искомой функции $y_i(0)$.

Введем новую переменную P_{ik} вида

$$P_{ik} = \varphi_{ik} \cdot q_k \tag{5}$$

Исходя из анализа размерностей тепловой постоянной времени T_k и искомой функции $y_i(\mathbf{0})$, переменная P_{ik} имеет размерность скорости изменения искомой функции $y_i(\mathbf{0})$. Из уравнений (4) и (5) следует, что при учете одной моды и при единичном значении P_{ik} асимптота функции $y_i(\mathbf{0})$ проходит через точку с координатами $(0,T_1)$. В этом случае значения амплитуды Y_{i1} и тепловой постоянной времени T_1 оказываются одинаковыми.

Уравнения (2) – (5) представляют базовые соотношения для теоретического модального анализа. На этапе эксплуатации станков актуальным является экспериментальный модальный анализ. Хотя в современных уже устоявшихся в мировой практике терминах точней будет использовать термин «операционный тепловой модальный анализ» [14, 19-22]. В этом случае по результатам тепловых испытаний формируется база экспериментальных данных температур элементов НСС и тепловых смещений его рабочих органов. Модальность теплового поведения станка находит отражение в его тепловых характеристиках, аппроксимируемых экспоненциальными кривыми [23]. Каждая тепловая характеристика станка, измеренная в фиксированной точке его НСС, представляет собой сумму экспоненциальных функций вида (4). Модальные параметры каждой температурной моды находятся после математической обработки экспериментальных характеристик. Уравнение (4) приобретает вид

$$y_{i}(\mathbf{y}) = \sum_{k=1}^{n} \left(Y_{ik} \cdot (-e^{-t/T_{ik}}) + y_{0ik} \cdot e^{-t/T_{ik}} \right)$$
 (6)

где Y_{ik} , T_{ik} , y_{0ik} – модальные параметры (амплитуда, постоянная времени и начальный уровень k -ой моды, соответственно).

Модальные параметры при реализации экспериментального и теоретического модального анализа принципиально отличаются по фактическим значениям. Тепловая постоянная времени

при использовании экспериментального модального анализа имеет локальный характер, что объясняет появление дополнительной индексации в подстрочном индексе. Таким образом, тепловая постоянная времени дополнительно зависит от точки измерения, в которой формировалась тепловая характеристика.

Перепишем уравнение (1) в физических координатах

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{1}{T_1} (T_1 \cdot P_1 - y_1) \tag{7}$$

где y_1 – физическая координата, мкм; T_1 – тепловая постоянная времени, мин; P_1 – тепловая нагрузка, мкм/мин.

Уравнение (7) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка. Решение уравнения (7) приведено в выражении (6).

С точки зрения теории автоматического управления уравнение (7) представляет собой описание апериодического звена первого порядка, передаточная функция для которого имеет вид

$$W(\mathbf{\hat{y}}) = \frac{k}{T \cdot \mathbf{\hat{y}} + 1} \tag{8}$$

где s – комплексная переменная, используемая при прямом преобразовании Лапласа; k – коэффициент усиления звена; T – постоянная времени.

Таким образом, уравнения (6)–(8) представляют три способа решения уравнения теплопроводности. В настоящее время при построении эффективных компьютерных и имитационных моделей, при создании различных автоматизированных систем компенсации смещений в станках зарубежные исследователи широко используют Matlab и Simulink [6, 12, 21, 24–26]. Зачастую перед исследователем при наличии альтернативных способов решения конкретной задачи возникает проблема выбора одного наиболее эффективного. В данной работе на примере решения простой задачи представлена методика построения одной тепловой модели тремя способами. Показано, что только решение сложной задачи позволило выбрать наиболее эффективный спо-

Построение мультимодальной имитационной модели станка. В общем случае при выполнении механической обработки детали шпиндель станка работает по связанной со сменой циклограмме, Тепловое поведение врашения. станка некоторой фиксированной частоте вращения в выделенной **HCC** характерной точке описывается ИЛИ одномодальной или

мультимодальной кривой называемой тепловой Экспериментальные характеристикой [27].тепловые характеристики станка, построенные разных частотах вращения шпинделя, различаются как амплитудами, так и тепловыми постоянными времени. характеристики станка связаны c его погрешностью [28]. Знание температурной фактической температурной погрешности станка с ЧПУ создает возможность ее коррекции, что существенно повышает точность обработки.

Сформулируем задачу: используя значения модальных параметров тепловых характеристик, полученных на станке при непрерывном режиме работы на фиксированных построить тепловую характеристику ДЛЯ режима работы станка сложного (при изменяющихся во времени частотах вращения шпинделя).

В работах [29, 30] изложена достаточно подробная используемая математическая и имитационная модели. Особенностью тепловых характеристик для сложного режима работы станка является их мультимодальный тип. При этом построение тепловой характеристики для второго и последующих участков циклограммы сложного режима работы мультимодального типа вызывает некоторые затруднения. Это объясняется тем, что из эксперимента невозможно определить значения параметров \mathcal{Y}_{0ik} . качестве модальных начального уровня искомой функции последующем участке циклограммы следует уровень искомой использовать сформированный в последний момент времени на предыдущем участке. Причем на каждом участке циклограммы, начиная со второго, тепловой процесс и, соответственно, процесс формирования температурной погрешности процессов станка представляет сумму нагревания и охлаждения.

Так как для решения задачи обеспечения теплоустойчивости станков наибольшую актуальность представляют тепловые смещения рабочих органов станка, поэтому в данной работе все модели описывают характеристики тепловых смещений рабочих органов станка.

Для удобства выявления достоинств и недостатков каждого из трех рассматриваемых ниже способов моделирования использован тестовый пример циклограммы работы станка, состоящей из трех участков. На первом участке длительностью 50 минут шпиндель станка вращался с частотой вращения 250 об/мин, на втором участке длительностью 110 минут — 5000 об/мин, на третьем участке длительностью 140

минут шпиндель станка опять был включен на частоте 250 об/мин.

Характерной особенностью этого примера является: использование одного участка с нулевыми начальными условиями для тепловых смещений; наличие участков циклограммы работы станка с ненулевыми начальными условиями; на последнем участке циклограммы работы станка мощность генерируемого теплового потока, обусловленная новой частотой вращения, существенно меньше мощности теплового потока, обусловленной остыванием станка.

Сформулированные особенности тестового примера циклограммы работы станка позволили выделить две типовые задачи: построение тепловой характеристики при нулевых условиях; построение начальных тепловой характеристики при ненулевых начальных условиях.

особенность Третья рассматриваемого тестового позволяет однозначно примера корректность увидеть учета ненулевых начальных условий. Так как корректность учета начальных условий заключается в том, что остывание станка должно фиксироваться, но менее интенсивное, чем при отсутствии Тестовая дополнительного подогрева. циклограмма может применяться для уточнения параметров соответствующих модальных тепловых характеристик.

Первая типовая задача: построение

тепловой характеристики при нулевых начальных условиях.

Первый способ моделирования c использованием Simulink основан на использовании аналитических решений теплопроводности. Этот способ уравнения моделирования применительно к температурам ранее уже был представлен в работе [30]. На рис. 1 представлена Simulink-модель в виде системы графических блок-диаграмм для первой частоты вращения шпинделя (для рассматриваемого тестового примера). Данная Simulink-модель собой имитационную представляет тепловых смещений гильзы шпиндельного узла, работающего непрерывно на одной частоте вращения при нулевых начальных данных.

Модель включает пять блоков (рис. 1): блокисточник *Clock*, используемый для генерации времени; блок-переключатель *Switch Case* с одним входом и любым количеством выходов, работающий в сочетании с блоком *Switch Case Action Subsystem*, определяющим один временной участок циклограммы работы станка; блок задания пользовательской функции *Fcn* (*Fcn*_250_1 и *Fcn*_250_2); блок виртуального осциллографа *Scope*.

Основная сложность модели – вид пользовательской функции Fcn. В данном примере две функции Fcn_250_1 (первая мода) и Fcn_250_2 (вторая мода) представляют тепловую характеристику (6).

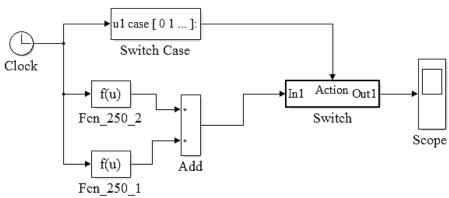


Рис. 1. Имитационная модель тепловых смещений гильзы шпиндельного узла на частоте 250 об/мин (1-й способ построения модели)

Второй способ моделирования основан на использовании встроенных средств решения дифференциальных уравнений в явной форме Коши (рис. 2). Принципиальным отличием этого способа создания имитационной модели от предыдущего является использование блока Differential Equation Editor (DEE). Данный блок используется в паре с блоком Constant, генерирую-

щим постоянное число в виде отношений соответствующих амплитуды и тепловой постоянной времени

$$C_{ik} = Y_{ik} / T_{ik} \tag{9}$$

где i – фиксированная точка НСС; k – номер молы.

В данной модели (рис. 2), каждая мода описывается двумя блоками ($Constant_1/DEE_250_1$ и $Constant_1/DEE_250_1$), которые суммируются

при помощи математического блока суммирования *Sum*.

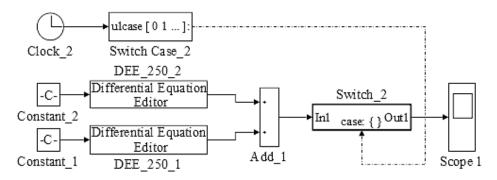


Рис. 2. Имитационная модель тепловых смещений гильзы шпиндельного узла на частоте 250 об/мин (2 способ построения модели)

Третий способ основан на использовании аппарата передаточных функций, базирующихся на уравнении (8). Структуры имитационных моделей при реализации третьим и вторым способами идентичны. Принципиальное отличие модели при этом способе реализации заключается в использовании блоков моделирования *Transfer Fcn*, основанных на передаточных функциях (рис. 3).

Вторая типовая задача: построение тепловой характеристики при ненулевых начальных условиях.

К сожалению, независимо от используемого способа построения имитационной модели, главной сложностью для решения этой типовой задачи является перераспределение между несколькими модами сформировавшегося на предыдущем участке циклограммы уровня смещений, принимаемых в качестве начальных условий на текущем участке циклограммы (второй и последующие участки циклограммы).

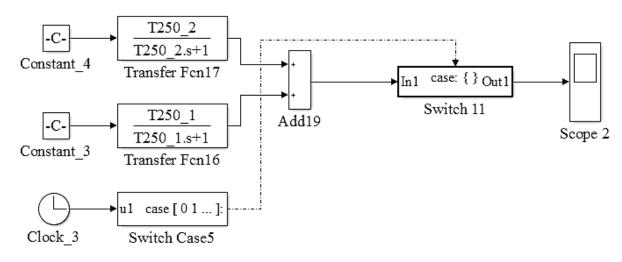


Рис. 3. Имитационная модель тепловых смещений гильзы шпиндельного узла на частоте 250 об/мин (третий способ построения модели)

Ранее в работах [29, 30] эта задача была решена путем использования тепловой постоянной времени только одной первой моды для описания процесса охлаждения станка, так как учет ненулевых начальных условий выполняется добавлением к процессу нагревания процесса охлаждения от сформировавшихся ненулевых начальных условий для рассматриваемого участка [17].

Такой подход оправдан только в том случае, если амплитуда второй и последующих мод существенно меньше амплитуды первой моды.

Если значения амплитуд сопоставимы по модулю, то в этом случае неизбежно формирование большой погрешности моделирования.

В данной работе предложен особый подход к формированию начального уровня для каждой моды y_{0ik} . Он реализуется в три основных этапа. Для каждого участка циклограммы работы станка введем надстрочный индекс (y).

На первом этапе находится сумма амплитуд всех мод, участвующих в формировании тепловой характеристики

$$A_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik}^{(i)} \tag{10}$$

Амплитуды каждой моды Y_{ik} на этом этапе моделирования уже известны после обработки результатов натурных испытаний [29].

На втором этапе рассчитывается коэффициент пропорциональности

$$p_i^{(0)} = E_{0i}^{\ u} / A_i \tag{11}$$

где E_{0i} — начальный уровень сформировавшихся перемещений, мкм.

Здесь начальный уровень E_{0i} , начиная со второй участка циклограммы работы станка претерпевает изменения.

На третьем этапе рассчитываются для каждой моды для каждого участка циклограммы начальные уровни $y_{0ik}^{(l)}$

$$y_{0ik}^{(000)} = p_i^{\ u} \cdot Y_{ik}^{\ u} \tag{12}$$

Таким образом, тепловая характеристика для каждого участка () циклограммы работы станка приобретает уточненный вид

$$y_i^{000}(1) = \sum_{k=1}^n \left(Y_{ik}^u \cdot \left(-e^{-t/T_{ik}^{00}} \right) + y_{0ik}^u \cdot e^{-t/T_{ik}^u} \right)$$
 (13)

где $T_{ik}^{(\mu)}$ – тепловая постоянная времени соответствующей моды на отдельном участке циклограммы работы станка.

При первом способе реализации имитационной модели ее структура не претерпевает принципиальных изменений, но требует включения дополнительных блоков, моделирующих охлаждение станка от сформированного уровня E_{0i} .

При этом параллельно с S-моделью в Matlab загружается m-файл, который формирует в памяти системы необходимые для последующего моделирования параметры, описанные уравнениями (9)–(13).

Второй и третий способы моделирования имеют идентичную структуру. Особенностью практической реализации модели в отличие от первого способа является более сложный учет времени на отдельном участке циклограммы. Это объясняется следующим. Время для каждого участка циклограммы работы станка должно задаваться локально, то есть всегда начинаться от нуля. При реализации первого способа моделирования это легко обеспечивается программно в соответствующих блоках fcn. При использовании редактора дифференциальных уравнений DEE или передаточных функций локальное время на каждом из участков циклограммы реализуется использованием блоков управляемой задержки Delay. Время задержки **Transport** длительности первого участка циклограммы – 50 минут. На рис. 4 представлен вариант модели, в которой используется одна первая мода для моделирования охлаждения сформировавшегося уровня перемещений на первом участке у 01. На рис. 5 представлен вариант модели тестового примера циклограммы. На третьем участке циклограммы реализован алгоритм перераспределения начальных уровней $y_{0ik}^{(\mu)}$ согласно соотношениям (9)-(13).

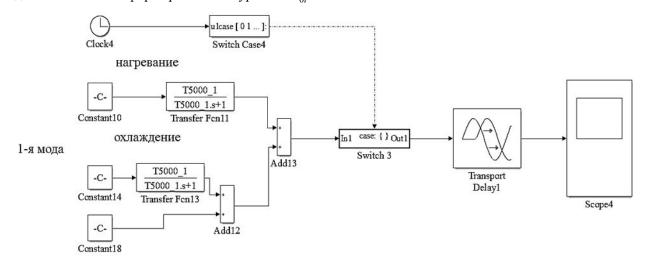


Рис. 4. Имитационная модель тепловых смещений гильзы шпиндельного узла на частоте 5000 об/мин (третий способ построения модели)

Натурный и машинный эксперименты. Для проверки точности разработанных имитационных моделей были проведены серии натурных и машинных экспериментов.

Натурный эксперимент проводился на станке 400V (производство ООО «НПО Станкостроение»). Для измерения температуры исполь-

зовался многоканальный измеритель температуры МИТ-12ТП, соединенный с двенадцатью термопарами, установленными в магнитных датчиках на НСС. Переключение каналов осуществлялось автоматически через каждую секунду. Схема расположения датчиков описана в работах [29, 30]. Дополнительно для измерения температурного поля отдельных наружных областей

НСС использовались тепловизор Testo 865 и инфракрасный термометр Testo 830-T2. В проведенных экспериментах расхождение показаний измерителя температур МИТ-12ТП и инфракрасного термометра Testo 830-T2 составляло около 0,5 °C. Для тепловизора Testo 865 эти расхождения составили около 2 °C.

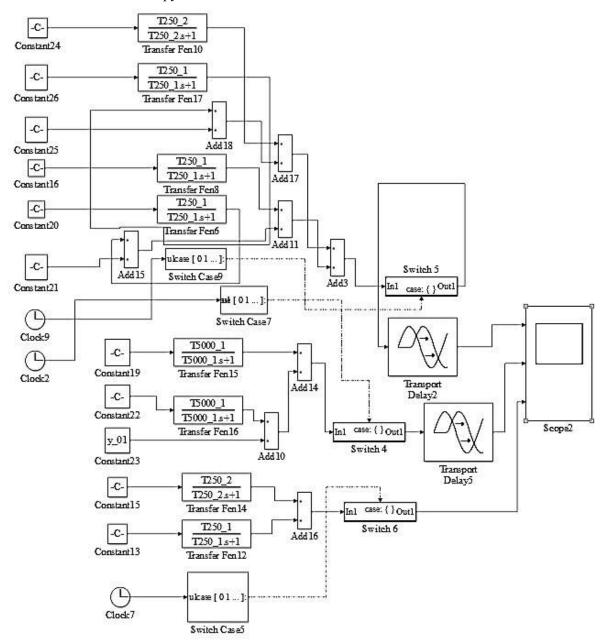


Рис. 5. Имитационная модель тепловых смещений гильзы шпиндельного узла при работе станка по циклограмме (тестовый пример)

Измерения тепловых смещений шпиндельной головки станка осуществлялось с помощью трех цифровых измерительных головок Norgau NID-1201, соединенных прямыми USB кабелями с компьютером. Передача данных в компьютер осуществлялась с помощью программного обеспечения USB-ITPAK/V2.1.

Натурные эксперименты проведены для двух циклограмм работы станка. Для второй циклограммы работы станка имитационная модель, реализованная первым способом моделирования, приведена на рис. 6.

Экспериментальные тепловые характеристики и гистограммы соответствующих циклограмм приведены на рис. 7, 8 и 9. Кривые 1 на

рис. 9 – это экспериментальные тепловые характеристики. Кривые 2 представляют тепловые характеристики, в которых учет начального уровня осуществляется по первой моде. Кривые 3 представляют тепловые характеристики, в которых использован новый алгоритм перераспределения

между несколькими модами сформировавшегося на предыдущем участке циклограммы теплового смещения гильзы шпиндельного узла.

Для построения тепловых характеристик для каждой циклограммы проводились по две серии экспериментов.

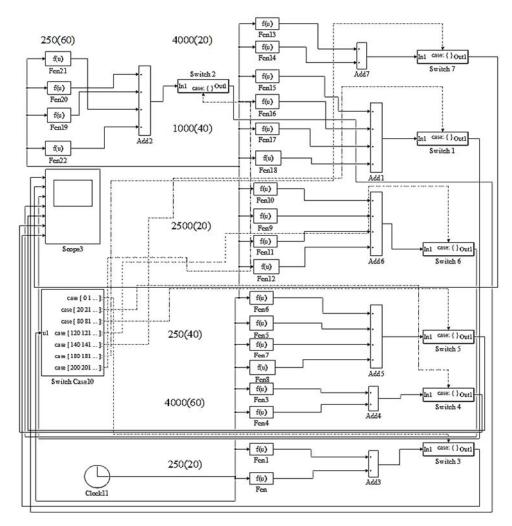


Рис. 6. Имитационная модель тепловых смещений гильзы шпиндельного узла при работе станка по второй циклограмме

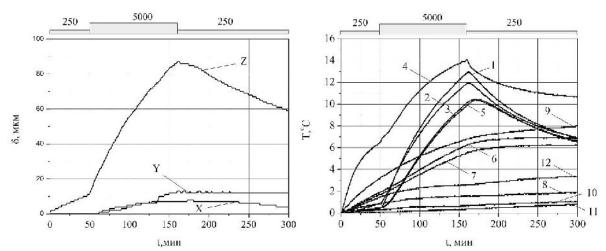


Рис. 7. Тепловые смещения гильзы шпинделя

Рис. 8. Температурные характеристики НСС

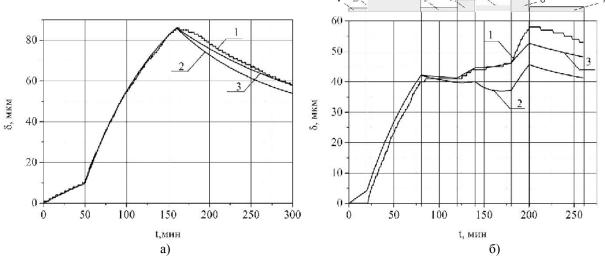


Рис. 9. Экспериментальные и расчетные тепловые смещения шпиндельной головки

В первой серии экспериментов испытания проводились на отдельных частотах вращения шпинделя при непрерывном режиме работы станка. Каждая из исследованных частот вращения шпинделя участвовала в формировании соответствующих циклограмм работы станка. Длительность каждого из испытаний была достаточна для того, чтобы получить максимально точный результат по идентификации модальных параметров [27]. Например, длительность испытаний станка на частоте 250 об/мин составляла шесть часов, на частоте 5000 об/мин – четыре часа. Эксперименты повторялись по пять раз. Для первой тестовой циклограммы эксперименты проводились на частотах: 250 и 5000 об/мин. Для второй циклограммы эксперименты дополнительно проводились на частотах: 1000, 2500 и 4000 об/мин.

Во второй серии экспериментов станок работал по циклограмме. Эксперименты также повторялись по пять раз. На рис. 7 и 8 приведены реальные экспериментальные характеристики (не усредненные и не аппроксимированные), зафиксированные в конкретный день проведения испытаний станка.

Машинный эксперимент также состоял из двух серий экспериментов.

В первой серии экспериментов с использованием экспериментального модального анализа по разработанному программному обеспечению находились модальные параметры и строились тепловые характеристики, описывающие тепловое поведение станка на отдельных частотах вращения шпинделя. Во второй серии экспериментов по предложенным выше имитационным моделям строились тепловые характеристики для заданной циклограммы и определялась погрешность моделирования.

Обсуждение полученных результатов. По результатам натурных экспериментов первой серии после реализации процедур экспериментального модального анализа была получены группа модальных параметров для всех двенадцати температурных характеристик и трех тепловых смещений. Для тепловых смещений гильзы шпиндельной головки по оси Z и для второго термодатчика модальные параметры приведены в табл. 1. Это объясняется следующим. Максимальные экспериментальные значения тепловых смещений шпиндельной головки станка, работающего на холостом ходу, фиксировались по оси Z . Самая высокая положительная связь между тепловыми смещениями и температурами была установлена для второго термодатчика. Значение коэффициента корреляции более 0,99. При проведении второй серии экспериментов расчет коэффициентов корреляции дал аналогичный результат.

Использование трех способов построения имитационных моделей позволило установить:

- максимальная сравнительная погрешность моделирования составила около 0.02~%;
- первый способ моделирования позволяет создавать более компактные модели, поэтому является предпочтительным.

Тестовая циклограмма использовалась для более точной настройки модальных параметров тепловых характеристик. Это объясняется тем, что модальные параметры были получены из решения задачи идентификации в экстремальной постановке. При этом, согласно теории оптимизации, в виду сложности аппроксимирующей функции найденные модальные параметры позволяют сформировать только некоторый локальный минимум. Это приводит к тому, что построение с их помощью тепловых характеристик осу-

ществляется с некоторой погрешностью. Подстраивая значения модальных параметров для разных участков циклограммы, но для одной частоты вращения шпинделя (в тестовой циклограмме это осуществлялось для частоты 250 об/мин), удалось существенно повысить точ-

ность построения тепловой характеристики циклограммы. Без подстройки модальных параметров погрешность моделирования прогнозной тепловой характеристики превышала 12 мкм. После уточнения модальных параметров для тепловой характеристики 250 об/мин погрешность моделирования не превысила 6 мкм.

Таблица 1

Модальные параметры

Параметр	Y_z		T_z]	Y_2	T_2		
Мода	1-я мода	2-я мода	1-я мода	2-я мода	1-я мода	2-я мода	1-я мода	2-я мода	
250 об/мин	47,40	-9,39	140,33	80,33	12,0082	-8,8012	131,2725	98,982	
5000 об/мин	111,089	-	102,000	-	15,4508	-0,94641	69,2402	4,6873	

Примечание:

 Y_z – амплитуда тепловых смещений;

 T_z – тепловая постоянная времени.

Сравнений результатов натурных и машинных экспериментов показало:

- использование алгоритма перераспределения между несколькими модами сформировавшегося на предыдущем участке циклограммы уровня тепловых смещений однозначно позволяет повысить точность прогнозирования;
- точность моделирования не превысила 10 %:
- высокой точности моделирования, например, в пределах даже пяти микрометров, обеспечить только по результатам прогнозирования без дополнительной коррекции практически невозможно.

Выводы. Использование Simulink следует рассматривать как один из возможных способов построения математических моделей. Проведенные исследования показали, что Simulink позволяет строить модели с несложной логикой, но достоинством построенных S-моделей является их наглядность и структурированность.

В работе рассмотрены три способа построения имитационных моделей в Simulink с использованием: аналитического решения уравнения теплопроводности, инструментов решения дифференциальных уравнений, аппарата передаточных функций. Эти способы рассмотрены на двух типовых задачах: построение тепловой характеристики станка при нулевых и ненулевых начальных условиях.

При моделировании циклограмм работы станка способ построения имитационных моделей, основанный на использовании аналитических решений уравнения теплопроводности, позволяет строить наиболее компактные модели.

При построении инвариантных моделей одновременно с S-моделью используются данные, генерируемые m-файлом Matlab.

При построении мультимодальных тепловых характеристик, основанных на экспериментальном модальном анализе, предложен новый алгоритм построения тепловых характеристик при ненулевых начальных условий. Он базируется на перераспределении между несколькими модами уровня тепловых смещений, сформированных на предыдущем участке циклограммы работы станка. Из натурных и вычислительных экспериментов было показано, что это однозначно позволило повысить точность прогнозирования.

В качестве дальнейшего развития применения Simulink для решения задачи снижения температурной погрешности станка является построение системы управления с обратной связью и регулятором.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке $P\Phi\Phi H$ в рамках научного проекта № 20-08-00359.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Уэмура Н. Общество 5.0: Взгляд MITSUBISHI ELECTRIC [Электронный ресурс] // Экономические стратегии. 2017. № 4. С. 122—131. URL:
- http://www.inesnet.ru/article/obshhestvo-5-0-vzglyad-mitsubishi-electric/ (дата обращения 28.11.2019).
- 2. Onday O. Japan's Society 5.0: Going Beyond Industry 4.0 // Bus Eco J. 2019. Vol. 10. Is. 2: 389. doi: 10.4172/2151-6219.1000389.
- 3. Jedrzejewski J., Kwasny W. Development of machine tools design and operational properties // Int

- J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 93. Is. 1-4. Pp. 1051–1068. doi: 10.1007/s00170-017-0560-2.
- 4. Ye W., Guo Y., Liang R., Xu J. Research on Thermo-Mechanical Coupling Deformation for the Ball Screw of Machine Tool Spindle Feed System // J. Vib. Eng. Technol. 2019. Vol. Online First. Pp. 1-12. doi: 10.1007/s42417-019-00182-5.
- 5. Hou R., Du H., Yan Z., Yu W., Tao T., Mei X. The modeling method on thermal expansion of CNC lathe headstock in vertical direction based on MOGA // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 9-12. Pp. 3629–3641. doi: 10.1007/s00170-019-03728-9.
- 6. Liu K., Li T., Wang Y., Sun M., Wu Y., Zhu T. Physically based modeling method for comprehensive thermally induced errors of CNC machining centers // Int J Adv Manuf Technol. 2018. Vol. 94. Is. 1-4. Pp. 463-474. doi: 10.1007/s00170-017-0736-9.
- 7. Li Q., Li H. A general method for thermal error measurement and modeling in CNC machine tools' spindle // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 5-8. Pp. 2739–2749. DOI: 10.1007/s00170-019-03665-7.
- 8. Xiang S., Deng M., Li H., Du Z., Yang J. Cross-rail deformation modeling, measurement and compensation for a gantry slideway grinding machine considering thermal effects // Measurement Science and Technology. 2019. Vol. 30. Is. 6. 12 p. doi: 10.1088/1361-6501/ab1232.
- 9. Fujishima M., Narimatsu K., Irino N., Mori M., Ibaraki S. Adaptive thermal displacement compensation method based on deep learning // CIRP journal of manufacturing science and technology. 2019. Vol. 25. Pp. 22–25. DOI: 10.1016/j.cirpj.2019.04.002.
- 10. Li T.J., Zhao C.Y., Zhang Y.M. Prediction method of thermal errors of the screw system in lathes based on moving thermal network // Precision Engineering. 2019. Vol. 59. Pp. 166-173. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.07.001.
- 11. Shi X., Wang W., Mu Y., Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 9-12. Pp. 4317-4329. DOI: 10.1007/s00170-019-03650-0.
- 12. Liu K., Liu H., Li T., Liu Y., Wang Y. Intelligentization of machine tools: comprehensive thermal error compensation of machine-workpiece system // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 102. Is. 9-12. Pp. 3865-3877. DOI: 10.1007/s00170-019-03495-7.
- 13. Zhu J., Ni J., Shih A.J. Robust Machine Tool Thermal Error Modeling Through Thermal Mode Concept // Journal of manufacturing science and engineering-transactions of the ASME. 2009.

- Vol. 130. Is. 6: 061006 (9 p.) doi: 10.1115/1.2976148.
- 14. Xia C., Fu J., Xu Y. et al. Machine tool selected point temperature rise identification based on operational thermal modal analysis // Int J Adv Manuf Technol. 2014. Vol. 70. Is. 1-4. Pp. 19–31. doi: 10.1007/s00170-013-5239-8.
- 15. Ewins D.J. Modal Testing: theory and practice. New York: John Wiley and Sons Inc. 1984, 320 p.
- 16. Matsuo M., Yasui T., Inamura T., Matsumura M. High speed test of termal effects for a mashine-tool structure based on modal analysis // Precision Engineering. 1986. Vol. 8. Is. 2. Pp. 72–80.
- 17. Хомяков В.С., Досько С.И., Поляков А.Н. Применение теоретического модального анализа к расчету температурных полей в металлорежущих станках // Известия вузов. Машиностроение. 1989. №9. С. 154–158.
- 18. Коллатц Л. Задачи на собственные значения. М.: Наука. 1968, 504 с.
- 19. Кравченко К.Ю., Кугаевский С.С., Журавлев М.П., Элькинд Д.М. Операционный модальный анализ для определения собственных частот колебаний // Вестник ПНИПУ. 2017. Т. 19. №2. С. 21–34.
- 20. Peng Y., Li B., Mao X., Liu H., Qin C., He H. A method to obtain the in-process FRF of a machine tool based on operational modal analysis and experiment modal analysis // Int J Adv Manuf Technol. 2018. Vol. 95. Is. 9-12. Pp. 3599–3607. doi: 10.1007/s00170-017-1405-8.
- 21. Li B., Li L., He H. et al. Research on modal analysis method of CNC machine tool based on operational impact excitation // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 1-4. Pp. 1155–1174. DOI: 10.1007/s00170-019-03510-x.
- 22. Chan Y.J., Huang J.W. Time-Domain Operational Modal Analysis in Machine Tools: Optimal Parameters and Practical Issues // Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2018. Vol. 19. Is. 6. Pp. 889–897. doi: 10.1007/s12541-018-0105-0
- 23. Поляков А.Н., Кравцов А. Г. Прогнозирование тепловых характеристик станка в условиях непрерывной работы // Вестник машиностроения. 2005. № 10. С. 43–49.
- 24. Hendrawan Y.M., Farrage A., Uchiyama N. Iterative NC program modification and energy saving for a CNC machine tool feed drive system with linear motors // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 102. Is. 9-12. Pp. 3543–3562. doi: 10.1007/s00170-019-03390-1.
- 25. Ma J., Hu G., Qin F., Su W., Jia Z. Optimization method of tool axis vector based on kinematical characteristics of rotary feed axis for curved surface machining // Int J Adv Manuf Technol. 2019.

- Vol. 100. Is. 5–8. Pp. 2007-2020. DOI: 10.1007/s00170-018-2738-7.
- 26. Mchichi N.A., Mayer J.R. Optimal calibration strategy for a five-axis machine tool accuracy improvement using the D-optimal approach // Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 1-4. Pp. 251-265. doi: 10.1007/s00170-019-03454-2.
- 27. Поляков А.Н., Парфенов И.В. Идентификация тепловых процессов в металлорежущих станках // Вестник машиностроения. 1995. №2. С. 19–22.
- 28. Кузнецов А.П. Тепловые процессы в металлорежущих станках. М.: Техносфера. 2019, 488 с.
- 29. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Парфенов И.В. Прогнозирование тепловых характеристик станков для сложного режима работы // Вестник МГТУ Станкин. 2019. №1 (48). С. 93–97.
- 30. Поляков А.Н., Парфёнов И.В. Имитационное моделирование тепловых процессов в станках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова . 2018. №9. С. 125–132.

Информация об авторах

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13

Никитина Инна Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет, Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13

Поступила в декабре 2019 г.

© Поляков А.Н., Никитина И.П., 2020

*Polyakov A.N., Nikitina I.P.

Orenburg State University

*E-mail: anp_temos@mail.ru

APPLICATION OF THE MODAL APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF MACHINES OPERATING IN COMPLEX MODE

Abstract. A methodology of building simulation models as applied to the thermal processes of machine tools in Simulink is presented. Three ways to building simulation models in Simulink are considered: by using the analytical solution of the thermal conductivity equation, tool for solving differential equations and apparatus of transfer functions. These three ways are presented for solving two typical problems: building the thermal characteristics of the machine tool under zero and non-zero initial conditions. Studies have shown that Simulink allows to build models with simple logic, but the advantage of the built S-models is their visibility and structuring. When modeling the diagrammatic works of the machine's operation, the method of building simulation models based on the use of analytical solutions of the thermal conductivity equation allows to build the most compact models. A feature of building invariant models in Simulink is the use of the Matlab m-file, in which the parameters used in the S-model are generated.

Keyword: thermal characteristics of the machine, thermal error, experimental modal analysis, simulation.

REFERENCES

- 1. Uemura N. Society 5.0: The MITSUBISHI ELECTRIC Look [Obshchestvo 5.0: Vzglyad MITSUBISHI ELECTRIC]. Ekonomicheskie strategii. 2017. No. 4. Pp. 122-131. Available at: http://www.inesnet.ru/article/obshhestvo-5-0-vzglyad-mitsubishi-electric/ (accessed 28.11.2019).
- 2. Onday O. Japan's Society 5.0: Going Beyond Industry 4.0. Bus Eco J. 2019. Vol. 10. Is. 2: 389. doi: 10.4172/2151-6219.1000389.
- 3. Jedrzejewski J., Kwasny W. Development of machine tools design and operational properties.

- Int J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 93. Is. 1-4. Pp. 1051–1068. doi: 10.1007/s00170-017-0560-2.
- 4. Ye W., Guo Y., Liang R., Xu J. Research on Thermo-Mechanical Coupling Deformation for the Ball Screw of Machine Tool Spindle Feed System. J. Vib. Eng. Technol. 2019. Vol. Online First. Pp. 1-12. doi: 10.1007/s42417-019-00182-5.
- 5. Hou R., Du H., Yan Z., Yu W., Tao T., Mei X. The modeling method on thermal expansion of CNC lathe headstock in vertical direction based on MOGA. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 9-12. Pp. 3629–3641. doi: 10.1007/s00170-019-03728-9.

- 6. Liu K., Li T., Wang Y., Sun M., Wu Y., Zhu T. Physically based modeling method for comprehensive thermally induced errors of CNC machining centers. Int J Adv Manuf Technol. 2018. Vol. 94. Is. 1-4. Pp. 463-474. doi: 10.1007/s00170-017-0736-9.
- 7. Li Q., Li H. A general method for thermal error measurement and modeling in CNC machine tools' spindle. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 5-8. Pp. 2739–2749. doi: 10.1007/s00170-019-03665-7.
- 8. Xiang S., Deng M., Li H., Du Z., Yang J. Cross-rail deformation modeling, measurement and compensation for a gantry slideway grinding machine considering thermal effects. Measurement Science and Technology. 2019. Vol. 30. Is. 6. 12 pp. doi: 10.1088/1361-6501/ab1232.
- 9. Fujishima M., Narimatsu K., Irino N., Mori M., Ibaraki S. Adaptive thermal displacement compensation method based on deep learning. CIRP journal of manufacturing science and technology. 2019. Vol. 25. Pp. 22-25. doi: 10.1016/j.cirpj.2019.04.002.
- 10. Li T.J., Zhao C.Y., Zhang Y.M. Prediction method of thermal errors of the screw system in lathes based on moving thermal network. Precision Engineering. 2019. Vol. 59. Pp. 166-173. doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.07.001.
- 11. Shi X., Wang W., Mu Y., Yang X. Thermal characteristics testing and thermal error modeling on a worm gear grinding machine considering cutting fluid thermal effect. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 9-12. Pp. 4317-4329. doi: 10.1007/s00170-019-03650-0.
- 12. Liu K., Liu H., Li T., Liu Y., Wang Y. Intelligentization of machine tools: comprehensive thermal error compensation of machine-workpiece system. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 102. Is. 9-12. Pp. 3865-3877. DOI: 10.1007/s00170-019-03495-7.
- 13. Zhu J., Ni J., Shih A.J. Robust Machine Tool Thermal Error Modeling Through Thermal Mode Concept. Journal of manufacturing science and engineering-transactions of the ASME. 2009. Vol. 130. Is. 6: 061006 (9 p.) doi: 10.1115/1.2976148.
- 14. Xia C., Fu J., Xu Y. et al. Machine tool selected point temperature rise identification based on operational thermal modal analysis. Int J Adv Manuf Technol. 2014. Vol. 70. Is. 1-4. Pp. 19–31. DOI: 10.1007/s00170-013-5239-8.
- 15. Ewins D.J. Modal Testing: theory and practice. New York: John Wiley and Sons Inc. 1984, 320 p.
- 16. Matsuo M., Yasui T., Inamura T., Matsumura M. High speed test of termal effects for a mashine-tool structure based on modal analysis. Precision Engineering. 1986. Vol. 8. Is. 2. Pp. 72–80.

- 17. Homyakov V.S., Dos'ko S.I., Polyakov A.N. Application of theoretical modal analysis to the calculation of temperature fields in metal-cutting machines [Primenenie teoreticheskogo modal'nogo analiza k raschetu temperaturnyh polej v metallorezhushchih stankah]. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. 1989. No 9. Pp. 154-158. (rus)
- 18. Kollatc L. Eigenvalue Tasks [Zadachi na sobstvennye znacheniya]. M.: Nauka. 1968, 504 p. (rus)
- 19. Kravchenko K.YU., Kugaevskij S.S., ZHuravlev M.P., El'kind D.M. Operational modal analysis to determine natural frequencies [Operacionnyj modal'nyj analiz dlya opredeleniya sobstvennyh chastot kolebanij]. Vestnik PNIPU. 2017. Vol. 19. No 2. Pp. 21–34. (rus)
- 20. Peng Y., Li B., Mao X., Liu H., Qin C., He H. A method to obtain the in-process FRF of a machine tool based on operational modal analysis and experiment modal analysis. Int J Adv Manuf Technol. 2018. Vol. 95. Is. 9-12. Pp. 3599–3607. doi: 10.1007/s00170-017-1405-8.
- 21. Li B., Li L., He H. et al. Research on modal analysis method of CNC machine tool based on operational impact excitation. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 1-4. Pp.1155–1174. DOI: 10.1007/s00170-019-03510-x.
- 22. Chan Y.J., Huang JW. Time-Domain Operational Modal Analysis in Machine Tools: Optimal Parameters and Practical Issues. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2018. Vol. 19. Is. 6. Pp. 889-897. doi: 10.1007/s12541-018-0105-0
- 23. Polyakov A.N., Kravcov A. G. Prediction of thermal characteristics of the machine in continuous operation [Prognozirovanie teplovyh harakteristik stanka v usloviyah nepreryvnoj raboty]. Vestnik mashinostroeniya. 2005. No 10. Pp. 43–49. (rus)
- 24. Hendrawan Y.M., Farrage A., Uchiyama N. Iterative NC program modification and energy saving for a CNC machine tool feed drive system with linear motors. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 102. Is. 9-12. Pp. 3543–3562. doi: 10.1007/s00170-019-03390-1.
- 25. Ma J., Hu G., Qin F., Su W., Jia Z. Optimization method of tool axis vector based on kinematical characteristics of rotary feed axis for curved surface machining. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 100. Is. 5-8. Pp. 2007–2020. doi: 10.1007/s00170-018-2738-7.
- 26. Mchichi N.A., Mayer J.R. Optimal calibration strategy for a five-axis machine tool accuracy improvement using the D-optimal approach. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 103. Is. 1-4. Pp. 251-265. doi: 10.1007/s00170-019-03454-2.
- 27. Polyakov A.N., Parfyonov I.V. Identification of thermal processes in metal-cutting machines. Bulletin of mechanical engineering [Identifikaciya

teplovyh processov v metallorezhushchih stankah]. Vestnik mashinostroeniya. 1995. No. 2. Pp. 19–22. (rus)

- 28. Kuznecov A.P. Thermal processes in metal cutting machines [Teplovye processy v metal-lorezhushchih stankah]. M.: Tekhnosfera. 2019, 488 p.
- 29. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Parfyonov I.V. Prediction of thermal characteristics of machines for complex operation [Prognozirovanie

teplovyh harakteristik stankov dlya slozhnogo rezhima raboty]. Vestnik MGTU Stankin. 2019. No. 1 (48). Pp. 93–97. (rus)

30. Polyakov A.N., Parfyonov I.V. Simulation of thermal processes in machines [Imitacionnoe modelirovanie teplovyh processov v stankah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 9. Pp. 125–132. (rus)

Information about the authors

Polyakov, Aleksandr N. PhD, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Поляков А.Н., Никитина И.П. Применение модального подхода к построению тепловых характеристик станков, работающих в сложном режиме) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 149–163. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-149-163

For citation:

Polyakov A.N., Nikitina I.P. Application of the modal approach to the construction of thermal characteristics of machines operating in complex mode. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 149–163. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-149-163

Научное издание

«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова» № 2, 2020 г.

Научно-теоретический журнал

Координатор журнала

Алфимова Наталия Ивановна

Редактор журнала

Агеева Марина Сергеевна

Компьютерная верстка

Яшкина Светлана Юрьевна

Перевод на английский язык

Колесник Оксана Юрьевна

Учредитель журнала — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС77-26533

Подписано в печать 27.02.2020. Формат $60 \times 84/8$ Усл. печ. л. 18,95. Уч.-изд. л. 20,38 Тираж 40 экз. Заказ 37. Цена договорная. Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 724/4 Гк. Номер сверстан в редакции научно-теоретического журнала «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова». Отпечатано в РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова