

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

5

2021

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**

№ 5, 2021 год

**SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL
BULLETIN
of BSTU named after V.G. Shukhov**

Vol. 5. 2021

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 (COPE).

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446 Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная
Подписан в печать	18.05.2021
Выход в свет	28.05.2021

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12.09. Уч.-изд. л. 13. Тираж 40 экз. Заказ № 47

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 heritage (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).

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446 Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	18.05.2021

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).

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 государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

Григачин 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).

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

Кожухова Марина Ивановна, PhD, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин

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

Леонovich Сергей Николаевич, иностранный член академик РААСН, 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-ОГНЕУПОР» (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 университета имени И.С. Тургенева (РФ, г. Орел).

Семенов 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 хозяйства 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).

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой 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).

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).

Vasily 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. Graboviy, 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 NII ZHB 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, Simferopol).

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

Marina I. Kozhukhova, PhD, Research Scientist, Department of Civil Engineering and Environmental Protection, College of Engineering and Applied Science, University of Wisconsin-Milwaukee (USA).

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. Stroikova, 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).

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ ЛЕГО-БЛОКОВ	8
Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД	19
Загороднюк Л.Х., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Синяков Д.А. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА РАЗНЫХ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЯХ	28
Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В. РЕКОНСТРУКЦИЯ ВАЛДАЙСКОГО ИВЕРСКОГО, СПАСО-ПРИЛУЦКОГО, И КИРИЛЛО-БЕЛОЗЕРСКОГО МОНАСТЫРЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ ПАЛОМНИЧЕСТВА И ТУРИЗМА	36
Петухова Н.М. ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО АНСАМБЛЯ ПРИВОКЗАЛЬНОЙ ЗНАМЕНСКОЙ ПЛОЩАДИ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ	50

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Борисов И.Н., Стронин А.А. ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ АССОРТИМЕНТОВ ДВУХШАРОВОЙ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ОТКРЫТОГО ЦИКЛА	63
Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ РЕФТИНСКОЙ ГРЭС В ПРОИЗВОДСТВЕ НЕПРЕРЫВНОГО СТЕКЛОВОЛОКНА	71

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Дмитриенко В.Г., Воронов В.П., Шеметов Е.Г., Шеметова О.М. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА НА ВЫХОДЕ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РАЗГОННОЙ ТРУБКИ СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ПЛОСКОЙ ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРОЙ ТОРООБРАЗНОЙ ФОРМЫ	82
Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Бражник Ю.В. ПРИВЕДЕНИЕ РАВНОНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ К АСИММЕТРИЧНЫМ, ПУТЁМ ИЗМЕНЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ ВЕЛИЧИН, СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЫНУЖДАЮЩУЮ СИЛУ	87
Чуев К.В., Дуюн И.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПА	95

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Salnikova A.S. HIGH-STRENGTH CONCRETE FOR LEGO BLOCKS	8
Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF MECHANICAL ACTIVATION OF SILICA-CONTAINING ROCKS	19
Zagorodnyuk L.K., Ryzhikh V.D., Sumskey D.A., Sinebok D.A. FEATURES OF THE FORMATION OF THE MICROSTRUCTURE OF GRANULAR AGGREGATES ON DIFFERENT BINDING COMPOSITIONS	28
Shvetsova-Shilovskaya E.A., Ilvitskaya S.V. RECONSTRUCTION OF THE VALDAI IVERSKY, SPASO-PRILUTSKY AND KIRILLO-BELOZERSKY MONASTERIES IN MODERN CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF PILGRIMAGE AND TOURISM	36
Petukhova N.M. CREATING OF THE ARCHITECTURAL ENSEMBLE OF THE ZNAMENSKAYA STATION SQUARE IN ST PETERSBURG	50

CHEMICAL TECHNOLOGY

Borisov I.N., Stronin A.A. INFLUENCE OF DIFFERENT ASSORTMENT OF TWO-BALL GRINDING LOAD ON THE PERFORMANCE OF AN OPEN-CYCLE BALL MILL	63
Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Evtushenko E.I. ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING ASH FROM REFTINSKAYA GRES THE PRODUCTION OF CONTINUOUS GLASS FIBER	71

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Dmitrienko V.G., Voronov V.P., Shemetov E.G., Shemetova O.M. MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE TWO-PHASE FLOW MOTION AT THE OUTLET OF THE VERTICAL ACCELERATION TUBE OF A JET MILL WITH A PLANE GRINDING CHAMBER OF TORUS FORM	82
Ryazantsev V.G., Gerasimov M.D., Brashnik J.V. REDUCTION OF DIFFERENTLY DIRECTIONAL VIBRATIONS O ASYMMETRICAL BY CHANGING THE RATIO OF VALUES COMPOSING THE DRIVING FORCE	87
Chuev K.V., Duyun I.A. SIMULATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A ROBOT MANIPULATOR USING A VIRTUAL PROTOTYPE	95

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-8-18

Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., *Сальникова А.С.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: privet.9292@mail.ru

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ ЛЕГО-БЛОКОВ

Аннотация. Одним из современных строительных решений, обеспечивающих снижение стоимости, повышение архитектурной выразительности и темпов осуществления работ, является так называемая лего-технология – развитие пазо-гребневых систем позиционирования и соединения мелкоштучных стеновых элементов. В настоящее время технология лего-блоков реализована на различных типах строительных материалов: керамическом и гиперпрессованном безобжиговом кирпиче, блоках из различных видов лёгких бетонов, которые не нашли широкого практического применения ввиду явного смещения баланса свойств либо в сторону эстетики – кирпич, либо теплоизоляции – блоки. В этой связи предложена технология получения многопустотных тонкостенных лего-блоков, на основе самоуплотняющихся высокопрочных мелкозернистых бетонов с различными типами высокопористого заполнения. В работе предложены составы высокопрочных бетонных смесей для изготовления каркасов лего-блоков. Основной акцент при разработке был сделан на повышение технологичности их получения и максимальную эффективность использования клинкерной составляющей. Преодоление проблемы многокомпонентности достигается заменой традиционного цемента специальным композиционным вяжущим «всё в одном». Ввиду неприемлемости для получения тонкостенных изделий из самоуплотняющихся мелкозернистых смесей традиционных методов дисперсного армирования, было предложено осуществлять дисперсное микроармирование на уровне цементного камня, для чего была разработана технология и определены оптимальные параметры диспергации стеклянной и базальтовой фибры. Благодаря такому подходу, армирующие волокна включены в состав непосредственно композиционного вяжущего, что обеспечивает максимальную технологичность и повышение прочности при сжатии до 20...25 %.

Ключевые слова: композиционное вяжущее, высокопрочный бетон, лего-блоки, самоуплотняющаяся смесь, добавка микроармирующая цементный камень.

Введение. Негативные воздействия окружающей среды все больше наносят удары по жизни человека, причиняя ощутимый ущерб его здоровью. В связи с этим, главной задачей ученых, работающих в различных сферах, особенно в строительном материаловедении является создание комфортных и безопасных условий существования человека.

Многэтажные здания, в частности – небоскребы, опасны, неустойчивы к природным катаклизмам, ресурсоемки, крайне дороги в утилизации и создают большие проблемы для будущих поколений. С целью оптимизации системы «человек-материал-среда обитания» необходимо внедрение принципа природоподобия создаваемых материалов, зданий и сооружений, диктуемых Геоникой (Геомиметикой) [1–3]. Индивидуальное жилищное строительство в наибольшей степени гармонизировано с экологией и не нарушает природный ландшафт. Жить в собственном доме комфортнее с точки зрения психологического климата, положительных эмоций, творческого настроения, мыслительной деятельности и, наконец, на увеличения продолжительности жизни человека.

В качестве стенового материала для различных видов индивидуального жилого строительства все большую популярность набирают так называемые лего-блоки, которые можно смело назвать новшеством на рынке модульных строительных систем. Они созданы по образу и подобию детского конструктора LEGO американским инженером Арнон Росаном. Такие блоки имеют выступы и впадины, которые при монтаже совпадают. Они крепятся, вставляясь один в другой очень точно, за счет чего при монтаже сборно-разборных сооружений пропадает необходимость применения раствора, и при необходимости переноса конструкции блоки легко демонтируются. При возведении постоянных домов из лего-блоков, для их соединения применяется небольшое количество клея, которым обрабатываются только вертикальные швы. Это значительно уменьшает время монтажа, благодаря чему существенно снижается стоимость строительно-монтажных работ [4].

В настоящее время технология лего-блоков реализована на различных типах строительных материалов: керамическом и гиперпрессованном безобжиговом кирпиче, блоках из различных ви-

дов лёгких бетонов [5–7]. Однако все эти решения не нашли широкого практического применения ввиду явного смещения баланса свойств либо в сторону эстетики – кирпич, либо теплоизоляции – блоки, а по-настоящему универсальные решения отсутствуют.

Как уже неоднократно отмечалось, все новые эффективные материалы сейчас рождаются за счёт интеграции нескольких подходов – концепция трансдисциплинарности [8]. В этой связи была предложена технология получения многопустотных тонкостенных Lego-блоков на основе самоуплотняющихся высокопрочных мелкозернистых бетонов с различными типами высокопористого заполнения.

Применение высокопрочных бетонов класса В90/100 и более позволяет существенно снизить степень заполнения сечения наиболее дорогим и ресурсоёмким конструкционным материалом за счёт уменьшения толщины стенок до 5–10 мм, а внутренних перегородок до 3–5 мм. Причём внутреннее пространство может быть решено в виде традиционных организованных структур – например, сотоподобной (рис. 1), или более прогрессивно в соответствии с канонами Геоники и Бионики. Последний случай технически может быть реализован за счёт объёмной печати полимерным материалом полого сердечника блока со сквозными каналами, заполняемыми в процессе формования самоуплотняющимся высокопрочным мелкозернистым бетоном.

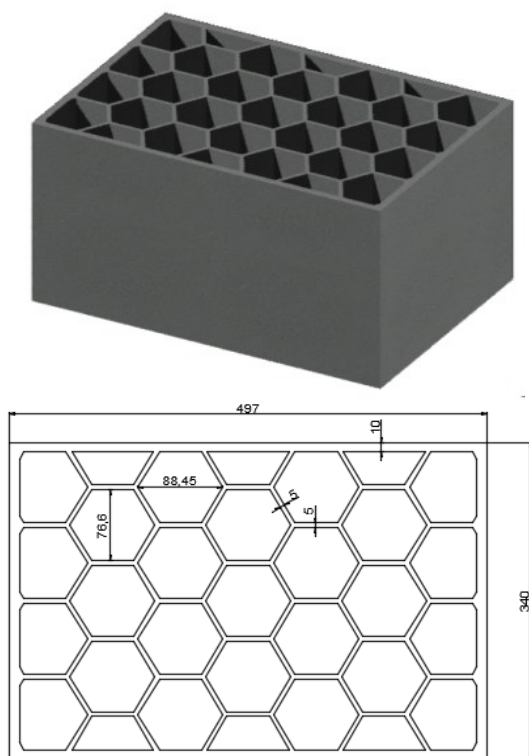


Рис. 1. Вариант исполнения внутреннего заполнения блока – сотоподобный

Однако существуют и определенные сложности при разработке самоуплотняющихся бетонных (СУБ) смесей для высокопрочных бетонов [9]. Основной из них является вяжущее, в качестве которого в основном применяется портландцемент, который по своим базовым показателям в основном не удовлетворяет требованиям ситуации из-за чего возникает необходимость дополнительного введения минеральных и химических компонентов, для придания системе необходимых свойства. Составы становятся многокомпонентными, что усложняет технологию производства. В данном случае целесообразным является переход на уже сбалансированные композиционные вяжущие [10–14].

Для практической реализации получения тонкостенных Lego-блоков, был разработан ряд специальных композиционных вяжущих «всё в одном». Такой подход позволяет на конечном этапе – при производстве изделий, (рис. 2) предельно упростить технологическую схему, то есть рецептура смеси упрощается до традиционного набора: вяжущее, вода, мелкий заполнитель, химическая добавка. Все необходимые остальные функциональные компоненты вводятся на высокотехнологичной стадии производства композиционного вяжущего (КВ).

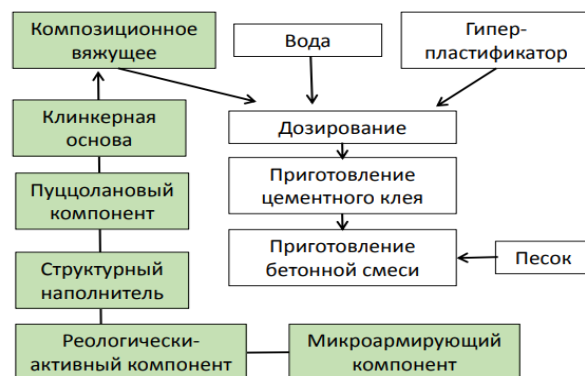


Рис. 2. Технологическая схема приготовления СУБ смесей на основе специального композиционного вяжущего

В предложенной технологической схеме тонкомолотый тяжелый бетон выступает сразу в трех ролях: в качестве пуццоланового компонента, так как обладает определённой пуццолановой активностью, в качестве реологически-активного компонента и структурного наполнителя, как минеральная добавка.

Открытым остаётся вопрос армирования композитов, с целью повышения прочности и многих других физико-механических параметров [15–17], для получения тонкостенных изделий из самоуплотняющихся мелкозернистых смесей. В данном случае традиционные методы дисперсного армирования не подходят, потому что для

заполнения стенок толщины 5–10 мм и внутренних перегородок до 3–5 мм нужна высокая текучесть системы. Присутствие традиционных разновидностей фибр либо снизит текучесть системы, либо течение будет происходить с обтеканием волокон. Возможным решением данной задачи может быть уменьшение размеров фибры с переносом ее действия на более меньший масштабный уровень – цементного камня, что позволит реализовать основные положительные эффекты армирования самоуплотняющихся смесей для тонкостенных изделий без ущерба (с сохранением самоуплотняемости и растекаемости смеси). Этим обуславливается значимость и актуальность проведенных исследований.

Материалы и методы. В работе применялись следующие основные материалы: ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ II/A-II 42,5Н СС Новороссийского цементного завода ОАО «Новоросцемент» (п. Верхнебаканский), кварцевый песок с зерновым составом 0,63 – 14 %, 0,315 – 45 % и 0,16 – 41 %, $M_{кр}=1,49$. Композиционное вяжущее KB70(ТБ) получали совместным помолом портландцемента и отсева дробления тяжелого бетона (фракций 1,25–0,14) в вибрационной мельнице до удельной поверхности 500...550 м²/кг.

Получение добавок микроармирующих цементный камень осуществлялось путем совместного помола в шаровой вращающейся мельнице кварцевого песка, стеклянного или базальтового фиброволокна соотношением компонентов 2:1 соответственно. Помол добавки осуществлялся при одинаковой загрузке 300 г., но при разном времени помола 6, 8, 12, 20 минут (рис. 3), оптимальное соотношение компонентов и время помола выбиралось исходя из прочностных характеристик бетона. Песок в данном случае выступает в качестве мелющих тел второго уровня, инициируемых мелющими шарами мельницы (мелющие тела первого уровня). Оценка длины волокон микроармирующих добавок осуществлялась по данным микроскопии. Для сравнения использовали базальтовую модифицированную фибру CemFibra R марки СЕММIX.

Для увеличения подвижности, снижения водопотребности смеси, а также придания ей способности к самоуплотнению применяли гиперпластификатор «MC-PowerFlow 3100 RU» производства MC-Bauchemie. Для оценки влияния на цементный камень полученных микроармирующих добавок были разработаны составы и заформованы образцы, с соотношением вяжущее:песок 1:1, это было принято из соображений обеспечения максимальной раздвижки зерен (так называемый «плавающий заполнитель»), что необходимо для максимальной реализации эффекта са-

моуплотнения. Определение физико-механических показателей осуществлялось по стандартным методикам.

Основная часть. Разработанные добавки микроармирующие цементный камень (рис. 3), представляют собой двух компонентную систему с частицами различных размеров и формы. Кварцевый песок в данном случае выступает как важный технологический компонент и выполняет три функции: обеспечивает измельчение волокон, предотвращает их комкование при хранении и введении в смесь, а также выступает в качестве дисперсного наполнителя. Частицы песка частично диспергированные в процессе обработки выполняют в композиционном вяжущем роль более мелкого наполнителя, чем обычный песок, что положительно влияет на прочностные характеристики конечного композита, за счёт уплотнения его структуры.

С целью оценки влияния разработанных добавок дисперсноармирующих цементный камень на прочностные свойства бетона проведены лабораторные испытания составов при одинаковых условиях и с одинаковым водоцементным отношением равным 0,45 (табл. 1), данная добавка вводилась взамен части цемента.

Анализируя данные таблицы видно, что уже на 7 сутки, что прочность камня из сульфатостойкого цемента с микроармирующей добавкой на основе стеклянного волокна выше, чем прочность на обычном цементе. Эта тенденция сохраняется и в марочном возрасте.

Контрольные образцы с базальтовой фиброй CemFibra R продемонстрировали в среднем сопоставимый, но уступающий лучшим разработанным составам уровень прочности. При этом фибра CemFibra R имеет существенно более низкую технологичность введения характерную для большинства видов подобных материалов. В структуре композита распределяется неравномерно с образованием комочков, нарушает процесс течения смеси, образуя заторы в наиболее узких местах. Разработанные составы микроармирующих добавок, напротив, легко в любом виде смешиваются с другими компонентами композиционного вяжущего, и не требуют специальных мероприятий по обеспечению однородности смеси, не оказывают заметного влияния на текучесть.

Наилучшие результаты показали составы 12 и 17 с микроармирующей добавкой на основе стеклянной фибры (длина волокон 0,08–0,57 мм и 0,16–0,52 мм соответственно) и 22 с микроармирующей добавкой на основе базальтовой фибры (длина волокон 0,29–0,15 мм), которые были приняты для дальнейшего изучения.

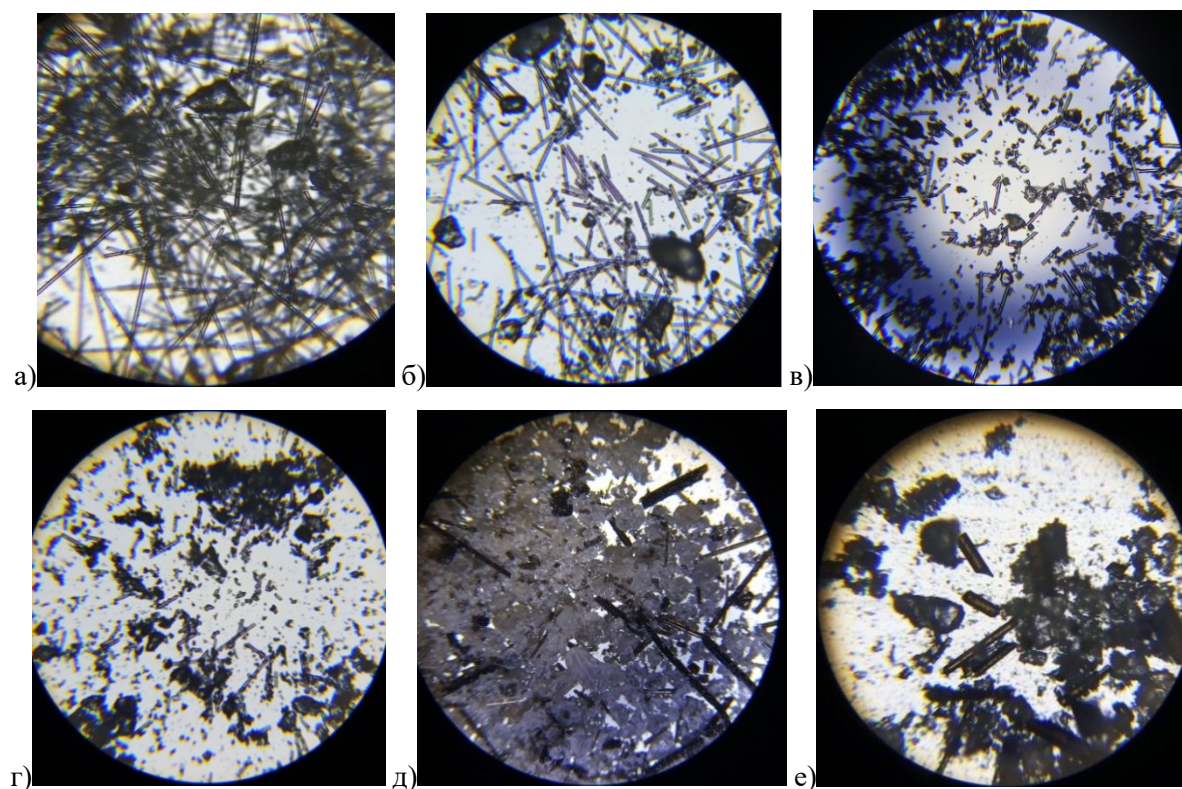


Рис. 3. Вид добавки под микроскопом (диаметр видимого поля 1,4 мм):
а) со стекловолокном 6 мин; б) со стекловолокном 8 мин; в) со стекловолокном 12 мин; г) со стекловолокном 20 мин; д) с базальтовым волокном 8 мин; е) с базальтовым волокном 12 мин

Таблица 1

Прочностные характеристики бетона с добавкой микроармирующей цементный камень

№	Состав						Ц:П	В:Ц	Плот- ность, кг/м³	Прочность, МПа		
	Вязущее	Микроармирующая добавка, %								7 сут.	28 сут.	
		6 мин	8 мин	12 мин	20 мин	CemFibra R						
Образцы с микроармирующей добавкой на основе стеклянного волокна												
1	ЦЕМ I 42,5Н	-	-	-	-	-	1:3	0,45	1940	29,1	52,5	
2			-	-	-	5			1856	20,6	34,7	
3			-	-	-	10			1939	25,5	41,3	
4			20	-	-	-			1835	19,3	33,9	
5			-	10	-	-			1885	23,8	41,7	
6			-	20	-	-			1942	21,8	33,9	
7			-	-	20	-			1851	20,6	34,4	
8	ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС		-	-	-	-			1965	32,2	50,4	
9			-	-	-	5			1891	25,2	35,3	
10			-	-	-	10			1883	22,7	37,8	
11			10	-	-	-			1932	35,8	45,3	
12			20	-	-	-			1833	37,3	54,8	
13			-	10	-	-			1965	35,6	45,2	
14			-	20	-	-			1845	28,3	34,2	
15			-	-	10	-			1931	29,2	46,0	
16			-	-	20	-			1924	20,0	47,1	
17			10	-	-	-			-	2046	37,3	51,9
18			20	-	-	-			-	2019	38,8	48,0
Образцы с микроармирующей добавкой на основе базальтового волокна												
19	ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС	-	10	-	-	-	1:3	0,45	1991	24,9	47,1	
20			20	-					1991	28,1	46,9	
21			-	10					1972	32,9	46,9	
22			-	20					2019	23,9	50,3	

Серьезной проблемой армирования бетонов неметаллической фиброй является возможность коррозии поверхности волокон. В литературе так же нет однозначного взгляда на этот вопрос [18, 19]. Известным способом повышения защиты волокном является ввод в состав бетонов активных минеральных добавок, таких как микрокремнезем или метаксаолинит [20]. В нашем случае для снижения риска повреждения фибры, предпочтение было отдано сульфатостойкому цементу,

нормированный минеральный состав которого и присутствие пуццолановых добавок способствуют, в том числе, снижению содержания не связанного гидроксида кальция, в значительной степени обуславливающего коррозионные процессы волокон фибры. Для оценки стойкости диспергированной фибры были изготовлены образцы, испытания которых проводились в марочном и существенно более поздних возрастах (табл. 2).

Таблица 2

Прочностные характеристики бетона с добавкой микроармирующей цементный камень

№	Вязущее	Микроармирующая добавка, %			Ц:П	В/Ц	Плотность, кг/м³	Прочность, МПа		
		8 мин	12 мин	20 мин				28 сут.	92 сут.	281 сут.
Образцы с микроармирующей добавкой на основе стеклянного волокна										
1	ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС	20	-	-	1:3	0,45	1940	54,8	48,6	51,5
2		-	10	-			1856	45,2	53,7	54
3		-	20	-			1939	34,2	48	49,6
4		-	-	20			1924	47,1	51,8	48
5	ЦЕМ I 42,5Н	20	-	-			1835	33,9	55,6	54,3
6		-	10	-			1885	41,7	56,6	55,8
7		-	-	20			1851	34,4	54,2	53,7

Как видно из таблицы, прочность образцов при хранении во влажных условиях (способствующих развитию коррозионных процессов) со временем возрастает или остаётся неизменной (в пределах точности опыта). Достаточный, на наш взгляд, уровень защиты фибры от деградации под действием щелочей обеспечивается присутствием в ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС пуццолановых компонентов. Оптимальной по совокупности факторов является добавка микроармирующая цементный камень полученная при измельчении по принятому режиму в течение 12 мин, вводимая в дозировке 20 % от массы вяжущего (состав 3, табл. 2). Указанное количество добавки включает в себя 1 массовую долю собственно стеклянного волокна и 2 доли диспергированного в процессе обработки кварцевого песка, за счёт чего

происходит уменьшение содержания клинкерной составляющей в смеси.

С использованием полученной микроармирующей добавки были разработаны композиционные вяжущие на ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС для самоуплотняющихся бетонов, реализующие принцип «всё в одном». В качестве многофункциональной минеральной добавки был применён тонкомолотый тяжелый бетон, эффективность использования которого подтверждена целым рядом работ [21–23]. Выбор данного вида минеральной добавки дополнительно обусловлен её пуццолановой активностью, что призвано обеспечить дополнительную защитную среду для фибры. Твердение образцов проходило в водной среде (табл. 3).

Таблица 3

Физико-механические свойства разработанных составов

№ состава	Состав вяжущего КВ70 (ТБ)				ГП, %	В/В	Соотношение Вяз:Песок	Плотность, кг/м³	Прочность, МПа		
	ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС, %	Тонкомолотый тяжелый бетон, %	Добавка микроармирующая цементный камень, %						5 сут	14 сут	28 сут
			на стеклянном волокне (2:1)	на базальтовом волокне (2:1)							
1	70	30	-	-	3	0,2	1:1	2463	123	123	162
2	63	27	10	-				2435	108	115	121
3	56	24	20	-				2400	98	117	145
4	63	27	-	10				2486	110	112	122
5	56	24	-	20				2404	101	104	133
Примечание: соотношение между цементом и минеральной добавкой во всех составах постоянное – 7:3											

Примечание: соотношение между цементом и минеральной добавкой во всех составах постоянное – 7:3

Составы с добавками на 7 сутки имеют приблизительно одинаковую прочность, но на 28

сутки разница в прочности увеличивается. Стоит отметить, что составы с разным фиброволокном

при введении 10 % добавки имеют одинаковую прочность (составы 2 и 4). Но при увеличении дозировки до 20 % прочность с добавкой армирующей цементный камень со стекловолокном (состав 3) увеличивается приблизительно на 10 % в сравнении с составом 5. Более высокие показатели контрольного состава объясняются тем, что

разработанная добавка вводится в замен клинкерной оставляющей вяжущего обеспечивая его ощутимую экономию. Полученные данные по сохранности волокон в цементном камне подтверждаются микроструктурными исследованиями (рис. 4).

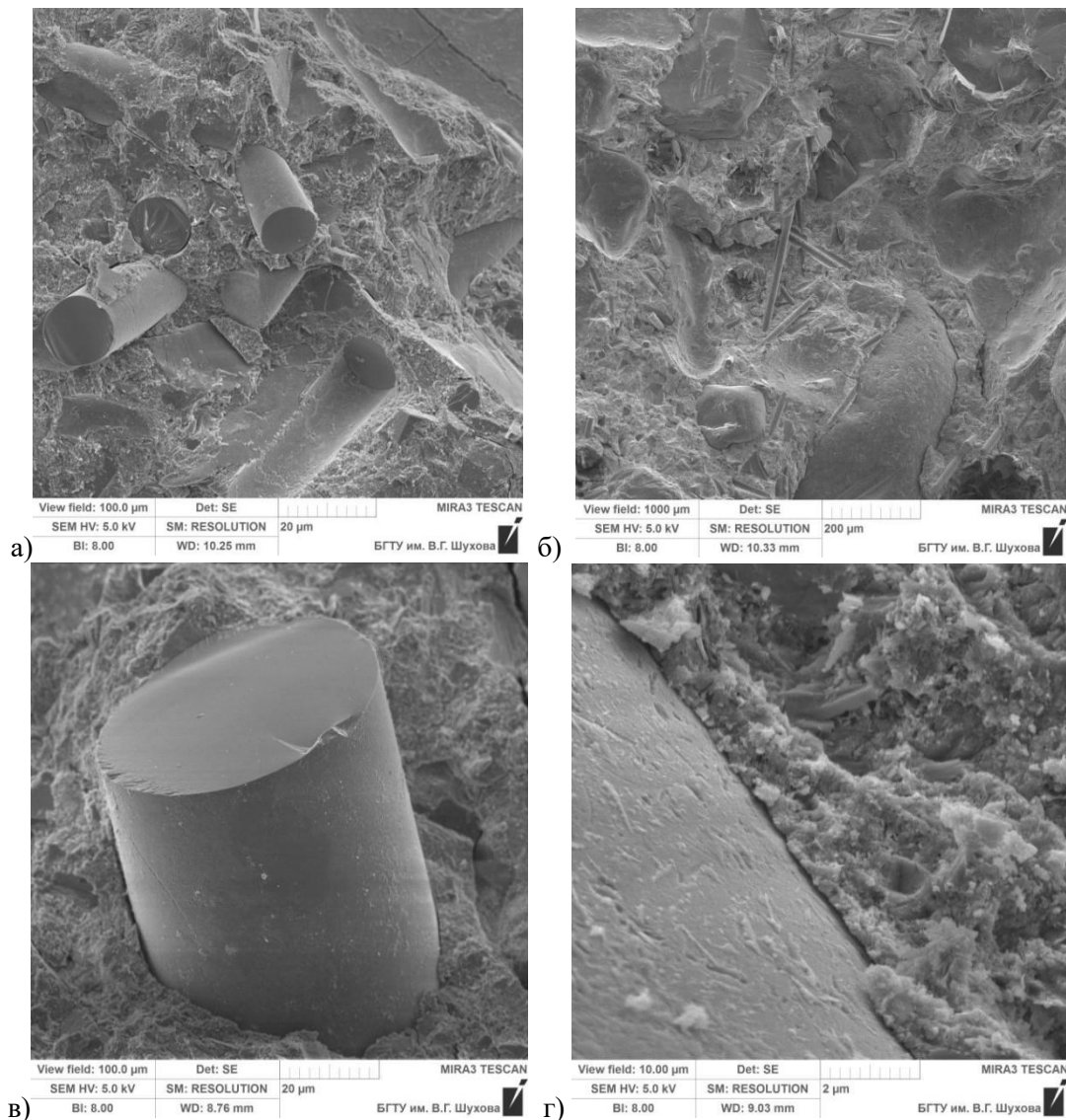


Рис. 4. Микрофотографии образцов в возрасте 280 суток: цементный камень (а) и мелкозернистый бетон (б) с микроармирующей добавкой на основе стеклянного волокна; цементный камень (в) и контактная зона (г) микроармирующей добавки на основе базальтового волокна

Как видно из микроснимков волокна микроармирующей добавки, без дополнительных мероприятий по обеспечению однородности, достаточно равномерно располагаются в объеме композита, усиливая участки цементного камня между частицами мелкого заполнителя (рис. 4 а, б). Разрушение микроармированного камня происходит как с разрывом волокон, так и с их вырыванием из матрицы. Последний случай, безусловно, является неоптимальным с позиции эф-

фективности передачи напряжений с камня на арматуру, однако некоторое недоиспользование потенциала волокон, на наш взгляд компенсируется высокой технологичностью вяжущих композиционных «всё в одном». Повышение адгезии может быть обеспечено модификацией поверхности волокон с повышением степени сродства с цементным камнем. Данный вопрос актуален также и для применяемого мелкого заполнителя. На микрофотографиях – рисунок 4 в и 4 г видно, что

контактная зона цементного камня и базальтового фиброволокна (рис. 4 в, г) несколько хуже, чем у составов со стекловолокном на поверхности, которых имеет место налипание цементного камня. Химическая реакция цемента со стеклянной фиброй (начальная степень коррозии поверхности) положительно влияет на степень адгезии. Этим объясняется разница прочностей составов 3 и 5 (табл. 3) с одинаковым количеством добавок на основе разных типов фибр. Стоит отметить, что не наблюдается явных каверн и уменьшения сечения волокон, а небольшие повреждения вероятно получены в процессе получения добавки при помоле и также могут способствовать обеспечению сцепления.

Предложенный способ армирования цементного камня на микроуровне, ввиду высокой технологичности и эффективности на уровне 15...20 % (по приросту прочности и экономии клинкерной составляющей), может, как дополнить традиционные способы использования фибр, так и применяться обособленно для смесей с высокой текучестью, применяемых для получения тонкостенных изделий. Наиболее эффективным, на наш взгляд, форматом продвижения микроармирующих добавок является их включение в состав широкого спектра композиционных вяжущих. Однако микроармирующая добавка может являться и самостоятельным товарным продуктом, сильной стороной которой является лёгкость применения и универсальность.

Освоение технологии производства тонкостенных Lego-блоков на основе микроармированных самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов, при использовании эффективных видов внутреннего высокопористого заполнения, даст новый импульс развитию этой технологии, идеально подходящей для малого бизнеса, позволит более полно раскрыть её потенциал, обеспечить конкуренцию традиционно применяемым материалам.

Выводы

1. Предложенное направление совершенствования технологии Lego-блоков за счёт уменьшения толщины стенок до 5–10 мм, а внутренних перегородок до 3–5 мм, достигаемое использованием высокопрочных самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов класса В90/100 и более, позволяет существенно снизить степень заполнения сечения наиболее дорогим и ресурсоёмким конструкционным материалом, минимизировать мостики холода, повысить качество и долговечность поверхности стен, снизить их удельную стоимость и зависимость качества монтажа от квалификации каменщика.

2. Для повышения технологичности полу-

чения высокопрочных самоуплотняющихся бетонов предложено использование композиционного вяжущего «всё в одном» включающего клинкерную составляющую, многофункциональную минеральную и микроармирующую добавки. Это позволяет, при сохранении всех функциональных качеств смесей и конечных композитов существенно упростить процесс их приготовления, доведя его до уровня рядовых бетонов. Данный аспект имеет большое значение для внедрения технологии на предприятиях малого бизнеса, зачастую испытывающих проблемы с оборудованием и технологической дисциплиной.

3. Предложенные добавки микроармирующие цементный камень, получаемые дополнительной диспергацией стандартных фибр, позволяют обеспечить армирование пространства между частицами мелкого заполнителя самоуплотняющегося бетона, сократить долю клинкерной составляющей без снижения прочности. Микроармирующие добавки полностью совместимы с самоуплотняющимися смесями, могут входить в состав композиционных вяжущих предназначенных для их получения. Применения микроармирующих добавок возможно как самостоятельного продукта, так и в дополнение к традиционным системам армирования.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-24113.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С., Шаталова С.В., Азизов В.Г., Богун Н.В., Семиохина В.А., Галкина А.А., Новоселова А.А. Геоника. Геомиметика как теоретическая основа совершенствования строительных материалов // В сборнике: Научные технологии и инновации. Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 278–282.
2. Lesovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H.B. Geonics (Geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing // В сборнике: 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences" 2019. С. 344–347.
3. Лесовик В.С., Першина И.Л., Бычкова А.А. Геоника. Геомиметика как принцип оптимизации триады "человек-материал-среда обитания" // В сборнике: Научные технологии и инновации. Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 273–277.

4. Mashkin N.A., Baev V.S., Fedchenko V. I., Zibnitskaja N. E., Sharavin J.A. New materials and technologies in construction of low-rise buildings from precision details foam concrete blocks // 2007 International Forum on Strategic Technology, Ulaanbaatar, Mongolia, 2007. Pp. 534–535, doi: 10.1109/IFOST.2007.4798652.
5. Ламов И.В., Гончарова М.А. Применение арболитовых блоков "LEGO" в малоэтажных жилых и производственных зданиях и сооружениях // Научные исследования: от теории к практике. 2015. Т. 2. № 4 (5). С. 47–50.
6. http://stroyka.by/news/2015/05/08/lego_block
7. https://www.zaggo.ru/article/stroitelstvo/steny/stroitelnyj_lego_kirpich_chem_on_otlichaetsya_ot_obychnogo_i_sto.html
8. Лесовик В.С., Фомина Е.В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1241–1257.
9. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // Строительные материалы. 2016. №1-2. С. 96–103
10. Vacheslav N. Yarmakovsky, P. Pustovgar Andrey The Scientific Basis for the Creation of a Composite Class Binders, Characterized of the Low Heat Conductivity and Low Sorption Activity of Cement Stone // Procedia Engineering. 2015. Vol. 111. Pp. 864–870.
11. Федюк Р.С., Мочалов А.В. Композиционные вяжущие для бетонов повышенной ударной стойкости // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 4 (200). С. 85–91.
12. Lesovik V., Voronov V., Glagolev E., Fediuk R., Baranov A., Alaskhanov A., Amran Y.H.M., Murali G. Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder // Journal of Building Engineering. 2020. Т. 31. 101414.
13. Алфимова Н.И., Жерновский И.В., Яковлев Е.А., Юракова Т.Г., Лесовик Г.А. Влиянии генезиса минерального наполнителя на свойства композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 91–94.
14. Lesovik R.V., Tolypina N.M., AlAni A.A., Jasim A.S. (2021) Composite Binder on the Basis of Concrete Scrap. In: Klyuev S., Lesovik V., Vatin N. (eds) Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol 95. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_46.
15. Ключев С.В. Разработка дисперсно-армированного мелкозернистого бетона на основе техногенного песка и композиционного вяжущего // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. Т. 11. Ч.2. С. 27–29.
16. Ключев А.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Свойства бетонной матрицы при дисперсном армировании фибрами // Сборник научных трудов Sworld. 2014. Т. 16. №2. С. 96–99.
17. Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 58–61.
18. Kharun M., Klyuev S., Koroteev D., Chidighikaobi P.C., Fediuk R., Olisov A., Vatin N., Alfimova N. Heat treatment of basalt fiber reinforced expanded clay concrete with increased strength for cast-in-situ construction // Fibers. 2020. Т. 8. № 11. 67.
19. Ключев С.В. Высокопрочный мелкозернистый фибробетон на техногенном сырье и композиционных вяжущих // Бетон и железобетон. 2014. № 4. С. 14–16.
20. Боровских И. В., Морозов Н. М. Повышение долговечности базальтовой фибры в цементных бетонах // Известия КазГАСУ. 2012. №2 (20). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-dolgovechnosti-bazaltovoy-fibry-v-tsementnyh-betonah>
21. Ахмед А.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохин Р.А., Муралли Г. Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и лёгкого бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3. С. 28–39.
22. Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аль Мамури С.К.Ш., Гунченко Т.С. Композиционные вяжущие на основе бетонного лома // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 7. С. 8–18.
23. Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А., Саидумов М.С., Омаров А.О. Разработка составов наполненных вяжущих на основе вторичного сырья для монолитных высокопрочных бетонов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46. № 3. С. 129–138.

Информация об авторах

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Елистраткин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сальникова Алёна Сергеевна, ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: privet.9292@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.03.2021 г.

© Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., 2021

Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., *Salnikova A.S.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: privet.9292@mail.ru

HIGH-STRENGTH CONCRETE FOR LEGO BLOCKS

Abstract. *Lego technology is one of the modern construction solutions providing cost reduction, increasing architectural expressiveness and the pace of work. This is the development of groove-ridge positioning systems and connection of small-piece wall elements. Currently, the technology of Lego blocks is implemented on various types of building materials: ceramic and hyper-pressed non-fired bricks, blocks from various types of lightweight concrete, which have not found wide practical application due to an obvious shift in the balance of properties either towards aesthetics – brick, or thermal insulation - blocks. In this regard, a technology for producing multi-hollow thin-walled lego blocks based on self-compacting high-strength fine-grained concrete with various types of high-porous filling is proposed. In this paper, the compositions of high-strength concrete mixes for the manufacture of lego block frames are proposed. The main emphasis in the development is made on improving the manufacturability of their production and the maximum efficiency of using the clinker component. Overcoming the multicomponent problem is achieved by replacing traditional cement with a special all-in-one composite binder. Due to the unacceptability of traditional methods of dispersed reinforcement for producing thin-walled products from self-compacting fine-grained mixtures, it is proposed to carry out dispersed micro-reinforcement at the level of cement stone, for which a technology is developed and the optimal parameters of dispersion of glass and basalt fiber are determined. Thanks to this approach, reinforcing fibers are included in the composition of the composite binder itself, which ensures maximum manufacturability and an increase in compressive strength up to 20 ... 25 %.*

Keywords: *composite binder, high-strength concrete, lego blocks, self-compacting mixture, micro-reinforcing cement stone additive.*

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Shatalova S.V., Azizov V.G., Bogun N.V., Semiokhina V.A., Galkina A.A., Novoselova A.A. Geonics. Geomimetics as a theoretical basis for improving building materials [Geonika. Geomimetika kak teoreticheskaya osnova sovershenstvovaniya stroitel'nykh materialov]. In the collection: Science-intensive technologies and innovations. Electronic collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Pp. 278–282. (rus)
2. Lesovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H.B. Geonics (Geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing. In the collection: 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences" 2019. Pp. 344–347.
3. Lesovik V.S., Pershina I.L., Bychkova A.A. Geonics. Geomimetics as a principle of optimization of the triad "man-material-environment" [Geonika. Geomimetika kak printsip optimizatsii triady "chelovek-material-sreda obitaniya"]. In the collection: Science-intensive technologies and innovations. Electronic collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Pp. 273–277. (rus)
4. Mashkin N.A., Baev V.S., Fedchenko V.I., Zibnitskaja N.E., Sharavin J.A. New materials and technologies in construction of low-rise buildings from precision details foam concrete blocks. 2007 International Forum on Strategic Technology, Ulaanbaatar, Mongolia, 2007. Pp. 534–535, doi: 10.1109/IFOST.2007.4798652.
5. Lamov I.V., Goncharova M.A. The use of wood concrete blocks "LEGO" in low-rise residential and industrial buildings and structures [Primeneniye arbolitovykh blokov "LEGO" v maloetazhnykh zhilykh i proizvodstvennykh zdaniyakh i sooruzheniyakh]. Scientific research: from theory to practice. 2015. Vol. 2. No.4 (5). Pp. 47–50. (rus)
6. http://stroyka.by/news/2015/05/08/lego_bloki

7. <https://www.zaggo.ru/article/stroitelstvo/steny/stroitelnyjlegokirpichchemonotlichatsyaotobychnogoisto.html>
8. Lesovik V.S., Fomina E.V. A new paradigm for the design of building composites to protect the human environment [Novaya paradigma proyektirovaniya stroitel'nykh kompozitov dlya zashchity sredy obitaniya cheloveka]. Vestnik MGSU. 2019. Vol. 14. No. 10. Pp. 1241–1257. (rus)
9. Kalashnikov V.I. Evolution of the development of compositions and changes in the strength of concrete. Concrete of the present and future. Part 1. Changing the composition and strength of concrete. Building materials. 2016. No. 1-2. Pp. 96–103
10. Vacheslav N. Yarmakovskiy, P. Pustovgar Andrey The Scientific Basis for the Creation of a Composite Class Binders, Characterized of the Low Heat Conductivity and Low Sorption Activity of Cement Stone. Procedia Engineering, Vol. 111. 2015. Pp. 864–870.
11. Fedyuk R.S., Mochalov A.V. Composite binders for concretes with increased shock resistance [Kompozitsionnyye vyazhushchiye dlya betonov povyshennoy udarnoy stoykosti]. Izvestiya of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science. 2018. No. 4 (200). Pp. 85–91. (rus)
12. Lesovik V., Voronov V., Glagolev E., Fediuk R., Baranov A., Alaskhanov A., Amran Y.H.M., Murali G. Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder. Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 31. 101414.
13. Alfimova N.I., Zhernovskiy I.V., Yakovlev E.A., Yurakova T.G., Lesovik G.A. Influence of the genesis of the mineral filler on the properties of composite binders [Vliyaniye genezisa mineral'nogo napolnitelya na svoystva kompozitsionnykh vyazhushchikh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2010. No. 1. Pp. 91–94. (rus)
14. Lesovik R.V., Tolypina N.M., AlAni A.A., Jasim A.S. (2021) Composite Binder on the Basis of Concrete Scrap. In: Klyuev S., Lesovik V., Vatin N. (eds) Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 95. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_46.
15. Klyuev S.V. Development of dispersed-reinforced fine-grained concrete based on technogenic sand and composite binder [Razrabotka dispersno-armirovannogo melkozernistogo betona na osnove tekhnogenogo peska i kompozitsionnogo vyazhushchego]. International research journal. 2014. Vol. 11. Part 2. Pp. 27–29. (rus)
16. Klyuev A.V., Netrebenko A.V., Durachenko A.V. Properties of a concrete matrix with dispersed fiber reinforcement [Svoystva betonnoy matritsy pri dispersnom armirovaniy fibrami]. Collection of scientific papers Sworld. 2014. Vol. 16. No. 2. Pp. 96–99. (rus)
17. Babaev V.B., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Basalt fiber as a component for micro-reinforcement of cement composites [Bazalt'ovoye volokno kak komponent dlya mikroarmirovaniya tsementnykh kompozitov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 4. Pp. 58–61. (rus)
18. Kharun M., Klyuev S., Koroteev D., Chidighikaobi P.C., Fediuk R., Olisov A., Vatin N., Alfimova N. Heat treatment of basalt fiber reinforced expanded clay concrete with increased strength for cast-in-situ construction. Fibers. 2020. Vol. 8 (11). 67.
19. Klyuev S.V. High-strength fine-grained fiber-reinforced concrete based on technogenic raw materials and composite binders [Vysokoprochnyy melkozernistyy fibrobeton na tekhnogenom syr'ye i kompozitsionnykh vyazhushchikh]. Concrete and reinforced concrete. 2014. No. 4. Pp. 14–16. (rus)
20. Borovskikh IV, Morozov NM Improving the durability of basalt fiber in cement concrete [Povyseniye dolgovechnosti bazalt'ovoy fibry v tsementnykh betonakh]. Izvestiya KazGASU. 2012. No. 2 (20). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/povyseniye-dolgovechnosti-bazaltovoy-fibry-v-tsementnyh-betonah_rus
21. Akhmed A.A., Fedyuk R.S., Liseytssev Yu.L., Timokhin R.A., Murali G. Use of Iraqi concrete scrap as a filler and aggregate for heavy and lightweight concrete [Ispol'zovaniye betonnoy loma Iraka v kachestve napolnitelya i zapolnitelya tyazhelogo i logkogo betona]. Building materials and products. 2020. Vol. 3. No. 3. Pp. 28–39. (rus)
22. Lesovik R.V., Ahmed A.A.A., Al Mamuri S.K.Sh., Gunchenko T.S. Composite binders based on concrete scrap [Kompozitsionnyye vyazhushchiye na osnove betonnoy loma]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 7. Pp. 8–18. (rus)
23. Alaskhanov A.Kh., Murtazaeva T.S.A., Saidumov M.S., Omarov A.O. Development of compositions of filled binders based on secondary raw materials for monolithic high-strength concretes [Razrabotka sostavov napolnennykh vyazhushchikh na osnove vtorichnogo syr'ya dlya monolitnykh vysokoprochnykh betonov]. Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2019. Vol. 46. No. 3. Pp. 129–138. (rus)

Information about the authors

Lesovik, Valery S. DSc, Professor. E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Elistratkin, Michael Yu. PhD. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Salnikova, Alyona S. Assistant. E-mail: privet.9292@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 26.03.2021

Для цитирования:

Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С. Высокопрочные бетоны для лего-блоков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-8-18

For citation:

Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Salnikova A.S. High strength concrete for lego-blocks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-8-18

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27

***Шаманина А.В., Айзеништадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е.**
Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Высшая инженерная школа
*E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. Горные породы различного химического и минералогического состава широко используются в качестве сырья в сфере промышленности строительных материалов. При этом предварительная механическая активация минерального сырья до тонкодисперсного состояния способствует изменению энергетического потенциала системы и оказывает влияние на склонность поверхности тонкодисперсной системы к трансформационным превращениям. Исследования физико-химической активности механоактивированных горных пород позволяют определить рациональные области использования минеральных компонентов. В работе представлены результаты оценки эффективности механоактивации кремнеземсодержащего сырья по значениям активности поверхности (k_s), определяемой как отношение величины свободной поверхностной энергии к удельной массовой энергии атомизации. Тонкодисперсные порошки были получены путем помола на планетарной шаровой мельнице до разной величины удельной поверхности кварцевого песка (1200–3000 м²/кг) и полиминерального песка (700–1335 м²/кг). Показано наличие функциональной зависимости активности поверхности от временных параметров механической активации исследуемых горных пород. Установлено, что механическая активация исходного сырья при оптимальном времени его помола позволяет достичь заданной величины активности поверхности. Параметр k_s рекомендовано использовать в качестве критерия для оценки эффективности процесса механической активации кремнеземсодержащих горных пород.

Ключевые слова: механоактивация, поверхностное натяжение, активность поверхности, свободная поверхностная энергия, удельная поверхность, кремнеземсодержащее сырье, кварцевый песок.

Введение. Перспективным направлением в области модификации строительных материалов из древесины является искусственное окаменение, технология которого заключается в обработке древесных материалов растворимым комплексом, повышающим устойчивость к гниению, воздействию биологических организмов и увеличивающим прочностные свойства материалов из растительного сырья [1]. Основой управляемого процесса минерализации древесной матрицы является использование органоминерального двухкомпонентного растворимого комплекса «арабиногалактан-кварцсодержащий полиминеральный песок» [2]. Структурообразование и химическая активность данного соединения во многом определяется активностью кремнеземсодержащего сырья [3]. При этом минеральный компонент предварительно подвергается механическому дроблению до тонкодисперсного состояния, при этом вводимая в систему энергия (численно равная работе измельчения) изменяет энергетический потенциал получаемого порошкового материала [4–6].

Исследования показали, что с точки зрения нанотехнологического подхода, склонность поверхности тонкодисперсной системы к трансформационным превращениям можно оценить исходя из термодинамической характеристики энергетического состояния этой системы [7–10].

Полученные энергетические характеристики механоактивированного кремнеземсодержащего сырья позволили сделать вывод о возможности использования диспергированных горных пород в качестве компонентов строительных материалов [11–14].

При выборе минерального сырья целесообразно в качестве критериев отбора использовать факторы, учитывающие природные условия процесса формирования дисперсной системы и техногенные условия, зависящие от параметров механического воздействия [15]. В данной работе в качестве такого критерия используется показатель активности поверхности тонкодисперсных систем (k_s) [11, 16], определяемый исходя из отношения величины свободной поверхностной энергии (E_s , Дж/кг) механоактивированной горной породы и удельной массовой энергии атомизации (E_m , Дж/кг). Нами в работах [17, 18] показано, что величину E_s можно рассчитать простым умножением свободной поверхностной энергии единицы поверхности (экспериментально определяемая величина поверхностного натяжения системы, σ , Дж/м²) на удельную поверхность порошка ($S_{уд}$, м²/кг). Удельная массовая энергия атомизации представляет собой отношение энергии атомизации (E_a , Дж) к молярной массе вещества, составляющего горную породу. Энергия

атомизации, в свою очередь, рассчитывается исходя из стандартных энтальпий образования химических соединений, составляющих анализируемые минеральные образы [11]. Значения энергетических макрохарактеристик сырьевых материалов (E_m), исследуемых в данной работе, приведены в [19, 20].

Материалы и методы. На данном этапе исследования в качестве исходного сырьевого материала были выбраны кварцевый песок и полиминеральный песок месторождения «Краснофлотский-Запад» (г. Архангельск), основными порообразующими минералами которого являются кварц (74 %) и альбит (17 %).

Химический состав исходных образцов определяли по результатам рентгенофлуоресцентного анализа, выполненного с помощью прибора ПРФА «МетЭксперт». Образцы механически активировали до получения разной величины площади удельной поверхности путем сухого измельчения в планетарно-шаровой мельнице Retsch PM100 при скорости вращения ротора 420 об/мин. Исходный кварцевый песок диспергировали в течение 15, 25, 30 и 45 минут. Песок месторождения «Краснофлотский-Запад» измельчали 15, 30, 40, 45 и 60 минут до получения значений удельной поверхности близких к кварцевому порошку. Удельную поверхность полученных тонкодисперсных порошков определяли на анализаторе Autosorb-iQ-MP.

Для исследований из полученных порошков на гидравлическом прессе ПЛГ-20 были изготовлены образцы-запрессовки диаметром 30 мм при воздействии в течение 2 минут фиксированного избыточного усилия 2, 4, 8, 12 и 16 тонн. Определение значений поляризационной (σ_s^p) и дисперсионной (σ_s^d) составляющей поверхностного натяжения (σ_s) определяли методом ОВРК (Оунса-Вендта-Рабея-Кьельбле). Эксперимен-

тальные значения краевого угла смачивания поверхностей образцов-запрессовок рабочими жидкостями с известными поляризационными и дисперсионными составляющими поверхностного натяжения (вода, глицерин, декан) были определены с помощью гониометра DSA-20E (EasyDrop).

Показатель активности поверхности дисперсных систем (k_s) определен с учетом значений удельной массовой энергии атомизации и свободной поверхностной энергии механоактивированной горной породы посредством выражения:

$$k_s = \frac{E_s}{E_m} \quad (1)$$

Значение величины свободной поверхностной энергии тонкодисперсных порошков рассчитывалось с помощью выражения:

$$E_s = \sigma \cdot S_{уд} \quad (2)$$

где $S_{уд}$, м²/кг – площадь удельной поверхности порошка;

σ , Дж/м² – поверхностное натяжение (численно равно свободной поверхностной энергии единицы поверхности).

Значения удельной массовой энергии атомизации образцов рассчитаны исходя из стандартных энтальпий образования химических соединений, составляющих минералы анализируемой горной породы.

Основная часть. Минеральный состав показал, что исследуемый образец кварцевого песка содержит (в пересчете на оксиды) 98,3 % SiO₂, в качестве примесей были обнаружены оксиды железа и титана. Исследуемый образец песка месторождения «Краснофлотский-Запад» содержит 91,35 % SiO₂, экспериментально определенный состав песка (в пересчете на оксиды) представлен в таблице 1. Высокое содержание в составе образца оксида кремния (IV) позволяет сделать вывод о возможности его использования в качестве компонента бетонной смеси.

Таблица 1

Минеральный состав песка месторождения «Краснофлотский-Запад»

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	Na ₂ O
91,35	5,06	0,74	0,65	0,26	0,04	0,36	0,02	0,04	0,02	1,37

Результаты определения поверхностного натяжения (σ_s , Дж/м²) исследуемых образцов-запрессовок, изготовленных при воздействии различной избыточной нагрузки на порошки разной степени диспергирования, показали, что увеличение времени механической активации сопровождается ростом величины поверхностного натяжения опытных образцов. Для кварцевого песка увеличение значений данного параметра наблюдается до критического времени помола, равного 30 мин, при длительности помола более 30 мин

происходит снижение величины этого показателя. Для природного полиминерального песка возрастание поверхностного натяжения от времени помола имеет линейный характер во всем измеряемом диапазоне удельных поверхностей.

Полученные экспериментально значения краевых углов смачивания (θ) рабочими жидкостями опытных образцов и рассчитанные на их основе значения поляризационной (σ_s^p) и дисперсионной (σ_s^d) составляющих поверхностного

натяжения и суммарная их величина (σ_s) приведены в таблицах 2 и 3 для кварцевого песка и песка месторождения «Краснофлотский-Запад» соответственно. Установлено, что увеличение усилия прессования опытных образцов сопровождается снижением значений краевых углов смачивания. На наш взгляд, это объясняется с одной стороны усилением дисперсионного взаимодействия между тонкодисперсными частицами полученных порошковых материалов (увеличение дисперсионной составляющей σ), приводящего к образованию более однородного поверх-

ностного слоя. С другой – уменьшением количества активных центров поверхности, энергетически способствующих проявлению адсорбционных сил взаимодействия капель рабочей жидкости с анализируемой поверхностью (уменьшение поляризационной составляющей σ). Поверхностное натяжение порошков (σ_{s0}) из сырьевых материалов для заданного времени измельчения определяли путем экстраполяции линейных зависимостей суммарного поверхностного натяжения, полученного для образцов под избыточной нагрузкой (p) на значение $p=0$.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные для образцов-запрессовок кварцевого песка

Время по- мола, мин	Усилие прессования, т	Краевые углы смачивания, $\theta_{cp} \pm 0,1, ^\circ$			Поверхностное натяжение, мДж/м ²		
		декан	глицерин	вода	σ_s^p	σ_s^d	σ_s
0	0	–	–	–	–	–	67,53
	2	12,0	20,5	19,1	45,32	22,12	67,43
	4	12,0	20,1	19,4	45,21	22,17	67,38
	8	11,9	19,6	19,9	45,02	22,26	67,28
	12	11,9	18,7	20,7	44,72	22,39	67,11
	16	10,6	18,4	21,3	44,38	22,55	66,93
15	0	–	–	–	–	–	67,58
	2	11,7	20,4	19,0	45,33	22,14	67,47
	4	11,7	20,0	19,2	45,27	22,19	67,45
	8	11,5	19,5	19,8	45,03	22,29	67,32
	12	11,3	18,6	20,6	44,71	22,43	67,15
	16	10,3	18,3	21,2	44,40	22,57	66,97
25	0	–	–	–	–	–	68,96
	2	11,6	16,1	15,4	46,54	22,35	68,89
	4	11,5	16,3	21,6	44,37	22,66	67,03
	8	11,4	16,2	23,8	43,39	22,87	66,26
	12	11,1	16,0	28,2	41,22	23,32	64,54
	16	10,1	15,9	29,7	40,36	23,55	63,91
30	0	–	–	–	–	–	71,12
	2	9,8	12,0	12,8	47,30	22,50	69,81
	4	9,7	13,0	21,7	44,23	23,02	67,25
	8	8,9	12,4	30,5	39,90	23,93	63,83
	12	7,8	11,8	35,9	36,11	24,81	60,92
	16	7,3	11,2	38,0	35,36	24,76	60,13
45	0	–	–	–	–	–	68,90
	2	14,4	17,9	16,0	46,66	21,95	68,61
	4	12,2	14,2	17,3	46,09	22,46	68,55
	8	9,9	12,8	18,8	45,40	22,80	68,20
	12	7,9	11,8	19,2	45,14	22,99	68,13
	16	7,3	11,5	22,0	43,99	23,25	67,24

Результаты экспериментального определения энергетических характеристик поверхности исследуемых механоактивированных порошков

и рассчитанные на основании выражения (1) значения активности поверхности (k_s) приведены в таблице 4 для кварцевого песка и в таблице 5 для песка месторождения «Краснофлотский-Запад».

Таблица 3

**Экспериментальные и расчетные данные для образцов-запрессовок песка месторождения
«Краснофлотский-Запад»**

Время по- мола, мин	Усилие прессования, т	Краевые углы смачивания, $\theta_{cp} \pm 0,1, ^\circ$			Поверхностное натяжение, мДж/м ²		
		декан	глицерин	вода	σ_s^p	σ_s^d	σ_s
15	0	—	—	—	—	—	69,22
	2	14,1	19,9	13,1	47,45	21,66	69,11
	4	14,0	18,2	13,5	47,37	21,82	69,19
	8	12,7	17,4	13,8	47,18	22,00	69,18
	12	11,4	16,0	15,2	46,68	22,27	68,96
	16	11,2	14,6	15,8	46,50	22,42	68,92
30	0	—	—	—	—	—	69,12
	2	14,6	19,8	13,8	47,31	21,66	68,97
	4	13,9	17,7	13,9	47,25	21,89	69,15
	8	11,8	16,7	14,0	47,06	22,13	69,19
	12	11,4	15,5	15,0	46,75	22,30	69,05
	16	11,2	14,3	15,9	46,47	22,44	68,92
40	0	—	—	—	—	—	69,32
	2	14,4	19,1	12,8	47,58	21,68	69,26
	4	13,8	16,5	14,1	47,21	22,00	69,21
	8	13,5	15,1	15,0	46,94	22,17	69,10
	12	13,0	14,6	16,0	46,59	22,30	68,88
	16	12,4	13,3	16,4	46,42	22,45	68,87
45	0	—	—	—	—	—	70,17
	2	14,2	16,1	9,9	48,29	21,81	70,10
	4	13,7	14,8	12,3	47,71	22,04	69,75
	8	13,3	14,4	14,6	47,05	22,21	69,26
	12	13,1	13,8	15,7	46,70	22,32	69,02
	16	12,1	15,6	16,3	46,40	22,32	68,71

Таблица 4

Энергетические характеристики поверхности порошков кварцевого песка

t, мин	$S_{уд}, м^2/кг$	$\sigma_{s0}, Дж/м^2$	$E_m, кДж/кг$	$E_s, Дж/кг$	$k_s \cdot 10^6$
0	1200	$67,53 \cdot 10^{-3}$	33,2 $\cdot 10^3$	81,0	2,44
15	2370	$67,58 \cdot 10^{-3}$		160,2	4,83
25	2690	$68,96 \cdot 10^{-3}$		185,5	5,59
30	3000	$71,12 \cdot 10^{-3}$		213,4	6,43
45	1570	$68,90 \cdot 10^{-3}$		108,2	3,25

Таблица 5

**Энергетические характеристики поверхности порошков песка месторождения
«Краснофлотский-Запад»**

t, мин	$S_{уд}, м^2/кг$	$\sigma_{s0}, Дж/м^2$	$E_m, кДж/кг$	$E_s, Дж/кг$	$k_s \cdot 10^6$
0	—	—	30,4 $\cdot 10^3$	—	0,25
15	700	$69,22 \cdot 10^{-3}$		48,46	1,59
30	950	$69,12 \cdot 10^{-3}$		65,66	2,16
40	890	$69,32 \cdot 10^{-3}$		61,70	2,03
45	795	$70,17 \cdot 10^{-3}$		55,78	1,83
60	1335	$70,50 \cdot 10^{-3}$		94,12	3,09

Зависимость активности поверхности образцов от времени механической активации представлена функцией $k_s=f(t)$ и приведена на ри-

сунке 1. Эта зависимость для исследуемых песков имеет схожий характер до времени помола, ограниченного 45 мин и подчиняется уравнению полинома второй степени общего вида:

$$y = -a_1 x^2 + a_2 x + a \quad (3)$$

где a – свободный член уравнения, численно равный значениям активности поверхности сырьевых материалов (для кварцевого песка $2,44 \cdot 10^{-6}$, для полиминерального песка $0,25 \cdot 10^{-6}$). Коэффициент достоверности аппроксимации 0,91 и 0,97 для порошков кварцевого песка и природного полиминерального песка соответственно.

При этом данные зависимости имеют экстремум при времени помола порядка 30 мин, этот

факт позволяет сделать вывод, что это время механической активации является оптимальным для исследуемых образцов. При продолжительности помола более 30 мин происходит снижение показателя активности поверхности, что на наш взгляд объясняется наличием избытка свободной поверхностной энергии (E_s) и стремлением тонкодисперсной системы уменьшить ее за счет самопроизвольной агрегации твердых частиц механически активированных порошков при увеличении времени механической активации.

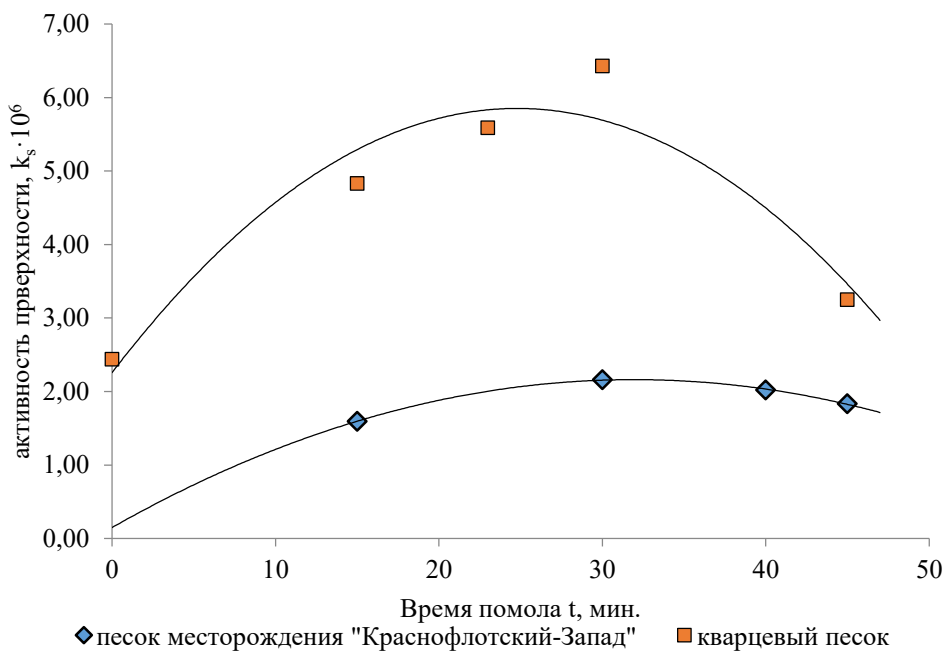


Рис. 1. Функциональные зависимости $k_s=f(t)$ для серий экспериментов с различным временным интервалом помола (до 45 минут)

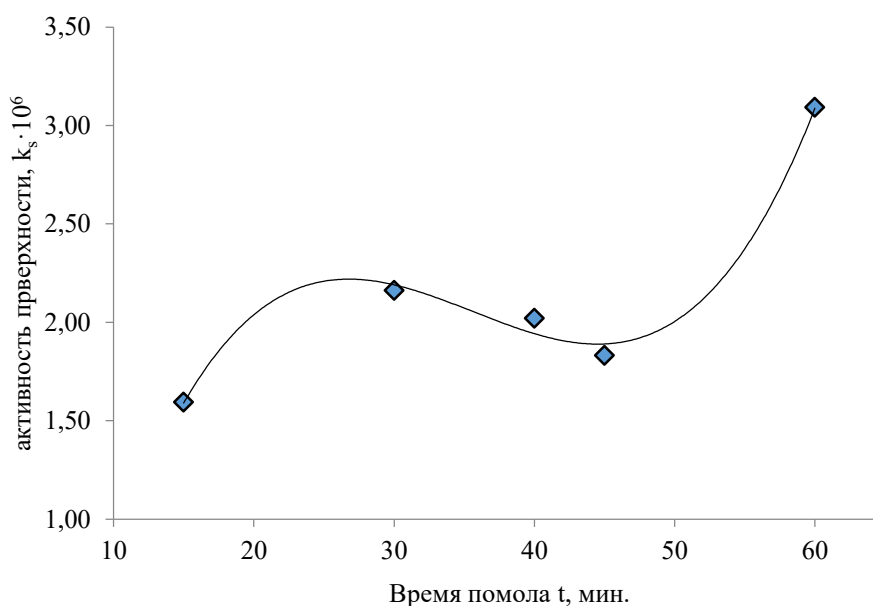


Рис. 2. Функциональная зависимость $k_s=f(t)$ для природного полиминерального песка с различным временным интервалом помола (до 60 минут)

Следует отметить, что увеличение времени механического диспергирования полиминерального песка месторождения «Краснофлотский-Запад» до 60 мин приводит к значительному увеличению значений удельной поверхности $S_{уд}$. Функциональная зависимость $k_s=f(t)$ для всего диапазона измерений представлена на рисунке 2. Данный факт может быть связан со сложным полиминеральным составом (табл. 1) и, как следствие, различной размолоспособностью минеральных составляющих исследуемого песка. Увеличение свободной поверхностной энергии при времени помола более 45 мин связано с механической активацией сопутствующих минералов, характерных для данного месторождения. Вместе с тем, отмеченный эффект может являться предметом отдельного изучения механизма процесса механического диспергирования полиминеральных песков.

Таким образом, для тонкодисперсного кварцевого порошка значение активности поверхности при оптимальном времени помола в 3 раза превышает показатель активности исходного кварцевого песка. Для механоактивированного песка месторождения «Краснофлотский-Запад» активность поверхности превышает данный показатель в сравнении с исходным песком в 8 раз. Результаты проведенных исследований показали, что путем механической активации исходного сырьевого материала можно достичь заданной величины активности поверхности.

Выводы. Установлено, что, оценивая эффективность механоактивации по значениям активности поверхности порошков, можно оптимизировать процесс, получая тонкодисперсные системы с заданной развитостью поверхности. Показано наличие функциональной взаимосвязи между k_s и временными параметрами механического диспергирования горных пород. При этом функциональная зависимость $k_s=f(t)$ имеет схожий характер для кварцевого песка и песка месторождения «Краснофлотский-Запад», подчиняясь уравнению полинома второй степени и характеризуется экстремумом при времени помола порядка 30 мин. Механическая активация исходного сырья при оптимальном времени его помола позволяет увеличить показатель активности поверхности в 3 раза от исходного значения для кварцевого песка и в 8 раз для песка месторождения «Краснофлотский-Запад»

Источник финансирования. Грант РФФИ 18-43-292002.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kiliusheva N.V., Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Stenin A.A. Organic-mineral modifier for petrification of wood // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences SGEM 2018: Nano, Bio and Green- Technologies for a Sustainable Future. 2018. №18. Pp. 385–392

2. Kilyusheva N.V., Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Belyaev A.O. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1697. 012242.

3. Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Kilyusheva N.V., Makhova T.A., Belyaev A.O. Colloid chemical aspects accelerated artificial petrification of wood. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400. 077053.

4. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худовекова Е.А., Бурьянов А.Ф., Фишер Х.Б. Активированные наполнители для гипсовых и ангидритовых смесей // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 14–17.

5. Худякова Л.И., Войлошников О.В., Котова И.Ю. Влияние механической активации на процесс образования и свойства композиционных вяжущих материалов // Строительные материалы. 2015. №3. С. 37–39.

6. Кара К.А. Изучение размолоспособности кварцсодержащих добавок как компонента композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 5. С. 45–52.

7. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Попов А.Л. Исследование активности кремнеземсодержащего сырья с учетом его состава и способа механоактивации // Международная научно-практическая конференция "Наукоемкие технологии и инновации" (XXII научные чтения). Сборник докладов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 295–299.

8. Вешнякова Л.А., Фролова М.А., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Михайлова О.Н., Махова Т.А. Оценка энергетического состояния сырья для получения строительных материалов // Строительные материалы. 2012. №10. С. 53–55.

9. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Вешнякова Л.А., Тутыгин А.С. Энергетика высокодисперсных композитов горных пород // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2013. № 3. С. 56–65.

10. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 2. С. 68–72.

11. Абрамовская И.Р., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Вешнякова Л.А., Фролова М.А., Казлитин С.А. Расчет энергоемкости горных пород –

как сырья для производства строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 23–25.

12. Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Композиционное вяжущее с минеральными добавками для неавтоклавных пенобетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 122–131.

13. Воронов В.В. Композиционные вяжущие с применением опоковидного мергеля для производства пенобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №1. С. 21–27.

14. Voitovich E.V., Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V., Chikileva E.N., Fischer H.-B., Makarova N.V. Influence of nanosized silica component on physical and mechanical properties of a composite gypsum binder // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 1756–1760.

15. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 1-2. С. 100–106.

16. Вешнякова Л.А., Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород // Материаловедение. 2016. № 5. С. 45–48.

17. Ролдунгин В.И. Физикохимия поверхности // Долгопрудный: Издательство Интеллект, 2008. 508 с.

18. Морозова М.В. Активность поверхности высокодисперсных систем на основе сапонит-содержащего отхода алмазодобывающей промышленности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №2. С. 5–9.

19. Морозова М.В., Акулова М.В., Фролова М.А., Щепочкина Ю.А. Определение энергетических параметров песков на примере месторождений Архангельской области // Материаловедение. 2020. №9. С. 45–48.

20. Зуев В.В., Поцелуева Л.Н., Гончаров Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов. СПб. 2006. 139 с.

Информация об авторах

Шаманина Александра Валерьевна, аспирант кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

Айзенштадт Аркадий Михайлович, доктор химических наук, профессор кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

Кононова Виолетта Михайловна, студент кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: viole-kononova@yandex.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

Данилов Виктор Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры композиционных материалов и строительной экологии. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Высшая инженерная школа; наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия.

Поступила 26.03.2021 г.

© Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е., 2021

***Shamanina A.V., Ayzenstadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E.**

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,

Graduate School of Engineering

**E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru*

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF MECHANICAL ACTIVATION OF SILICA-CONTAINING ROCKS

Abstract. Rocks of various chemical and mineralogical composition are widely used as raw materials in the construction materials industry. At the same time, preliminary mechanical activation of mineral raw materials to a finely dispersed state contributes to a change in the energy potential of the system and affects the tendency of the surface of a finely dispersed system to transformations. Studies of the physicochemical activity of mechanically activated rocks allow to determine the rational areas of use of mineral components. The paper presents the results of evaluating the efficiency of mechanical activation of silica-containing raw materials by

the values of surface activity (k_s), defined as the ratio of the value of the free surface energy to the specific mass energy of atomization. Fine powders are obtained by grinding in a planetary ball mill to a different specific surface area of quartz sand (1200–3000 m²/kg) and polymineral sand (700–1335 m²/kg). The presence of a functional dependence of the surface activity on the time parameters of mechanical activation of the studied rocks is shown. The mechanical activation of the feedstock at the optimal time of its grinding makes it possible to achieve a given value of the surface activity. It is recommended to use the k_s parameter as a criterion for assessing the efficiency of the process of mechanical activation of silica-containing rocks.

Keywords: mechanical activation, surface tension, surface activity, free surface energy, specific surface area, silica-containing raw material, quartz sand.

REFERENCES

1. Kiliusheva N.V., Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Stenin A.A. Organic-mineral modifier for petrification of wood. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconferences SGEM 2018: Nano, Bio and Green- Technologies for a Sustainable Future. 2018. No. 18. Pp. 385–392
2. Kilyusheva N.V., Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Belyaev A.O. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1697. 012242.
3. Danilov V.E., Ayzenshtadt A. M., Kilyusheva N.V., Makhova T. A., Belyaev A.O. Colloid chemical aspects accelerated artificial petrification of wood. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1400. 077053.
4. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefed'ev A.P., Hudovekova E.A., Bur'yanov A.F., Fisher H.B. Activated fillers for gypsum and anhydrite mixtures [Aktivirovannye napolniteli dlya gipsovyyh i angidritovyh smesey]. Construction Materials. 2018. No. 8. Pp. 14–17. (rus)
5. Hudyakova L.I., Vojloshnikov O.V., Kotova I.Yu. Effect of mechanical activation on the formation process and properties of composite binders [Vliyanie mekhanicheskoy aktivatsii na process obrazovaniya i svoystva kompozitsionnykh vyazhushchih materialov]. Construction Materials. 2015. No. 3. Pp. 37–39. (rus)
6. Kara K.A. Study of grindability of quartz-containing additives as component binders [Izucheniye razmolosposobnosti kvarcsoderzhashchih dobavok kak komponenta kompozitsionnykh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 5. Pp. 45–52. (rus)
7. Strokova V.V., Nelyubova V.V., Popov A.L. Investigation of the activity of silica-containing raw materials, taking into account its composition and method of mechanical activation [Issledovanie aktivnosti kremnezemsoderzhashchego syr'ya s uchetom ego sostava i sposoba mekhanoaktivatsii]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Naukoemkie tekhnologii i innovatsii" (XXII nauchnye chteniya). Sbornik dokladov. BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. Pp. 295–299. (rus)
8. Veshnyakova L.A., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Mikhailova O.N., Makhova T. A. Assessment of the energy state of raw materials for the production of building materials [Ocenka energeticheskogo sostoyaniya syr'ya dlya polucheniya stroitel'nykh materialov]. Construction Materials. 2012. No. 10. Pp. 53–55. (rus)
9. Abramovskaya I.R., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Veshnyakova L.A., Tutugin A.S. Energy of highly dispersed composites of rocks [Energetika vysokodispersnykh kompozitov gornyyh porod]. Nanotechnologies in construction: scientific online journal. 2013. No. 3. Pp. 56–65. (rus)
10. Veshnyakova L.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A. Assessment of surface activity of highly dispersed raw materials for composite building materials [Ocenka poverhnostnoy aktivnosti vysokodispersnogo syr'ya dlya kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov]. Physics and Chemistry of Materials Treatment. 2015. No. 2. Pp. 68–72. (rus)
11. Abramovskaya I.R., Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Veshnyakova L.A., Frolova M.A., Kazlitin S. A. Calculation of the energy intensity of rocks – as raw materials for the production of building materials [Raschet energoemkosti gornyyh porod – kak syr'ya dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov]. Industrial and civil construction. 2012. No. 10. Pp. 23–25. (rus)
12. Netsvet D.D., Nelyubova V.V., Strokova V.V. Composite binder with mineral additives for non-autoclave foam concrete [Kompozitsionnoe vyazhushchee s mineral'nymi dobavkami dlya neavtoklavnykh penobetonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 122–131. (rus)
13. Voronov V.V. Composite binders with the use of opoka-like marl for the production of foam concrete [Kompozitsionnye vyazhushchie s primeneniem opokovidnogo mergelya dlya proizvodstva penobetona]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. №1. Pp. 21–27. (rus)
14. Voitovich E.V., Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V., Chikileva E.N., Fischer H.-B., Makarova N.V. Influence of nanosized silica component on physical and mechanical properties of a composite gypsum binder. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 1756–1760.

15. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A. M. Some aspects of technogenic metasomatism in building materials science [Nekotorye aspekty tekhnogenennogo metasomatoza v stroitel'nom materialogovedenii]. Construction Materials. 2019. No. 1-2. Pp. 100–106. (rus)

16. Veshnyakova L.A., Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Tutygin A.S. Surface activity of siliceous rocks [Poverhnostnaya aktivnost' kremnesoderzhashchih gornyh porod]. Materials Science. 2016. No. 5. Pp. 45–48. (rus)

17. Roldungin V.I. Physicochemistry of the surface [Fizikohimiya poverhnosti]. Dolgoprudny: Intellect Publishing House. 2008. 508 p. (rus)

18. Morozova M.V. Surface activity of highly dispersed systems based on saponite-containing

waste from the diamond mining industry [Aktivnost' poverhnosti vysokodispersnyh sistem na osnove saponit-soderzhashchego othodaalmazodobyvayushchej promyshlennosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 2. Pp. 5–9. (rus)

19. Morozova M.V., Akulova M.V., Frolova M.A., Shchepochkina Yu. A. Determination of energy parameters of sands on the example of deposits of the Arkhangelsk region [Opredelenie energeticheskikh parametrov peskov na primere mestorozhdenij Arhangel'skoj oblasti]. Materials Science. 2020. No. 9. Pp. 45–48. (rus)

20. Zuev V.V., Potselueva L.N., Goncharov Yu.D. Crystal energy as a basis for assessing the properties of solid-state materials [Kristalloenergetika kak osnova ocenki svoystv tverdotel'nyh materialov]. St. Petersburg. 2006. 139 p. (rus)

Information about the authors

Shamanina, Aleksandra V. Postgraduate student. E-mail: alexandra.shamanina@yandex.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

Ayzenshtadt, Arcady M. DSc, Professor. E-mail: a.isenshtadt@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

Kononova, Violetta M. Student. E-mail: viole-kononova@yandex.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

Danilov, Victor E. Assistant professor, PhD. E-mail: v.danilov@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Graduate School of Engineering. Northern Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, 163002, Russia.

Received 26.03.2021

Для цитирования:

Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. Оценка эффективности механоактивации кремнеземсодержащих горных пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-19-27

For citation:

Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. Estimation of the efficiency of mechanical activation of silica-containing rocks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-28-36

Загороднюк Л.Х., *Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Синебок Д.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

*E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА РАЗНЫХ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЯХ

Аннотация. Настоящая работа включает исследование микроструктуры гранулированных заполнителей, приготовленных на разных вяжущих композициях. Представленная работа включает три части, посвященных анализу микроструктур гранулированных заполнителей с учетом изменения процентного содержания минерального наполнителя в вяжущих композициях. В статье рассмотрены основные аспекты формирования структуры гранулированных заполнителей при гидратации портландцемента (ПЦ 500-Д0-Н) и вяжущей композиции (ПЦ 500-Д0-Н + 10 % кварцевого песка), приготовленной в вихревой струйной мельнице. Выявлены основные закономерности влияния и дисперсности кварцевого минерального наполнителя (фракций $\leq 0,16$; $\leq 0,315$; $\leq 0,63$ мм) на структурообразование при гидратации вяжущих компонентов, отличающихся различным составом и дисперсностью частиц. В работе проведен анализ физико-механических испытаний наиболее перспективных образцов с изучением особенностей их микроструктур. В исследовании микроструктур образцов выявлены общие закономерности прорастания кристаллических фаз разной плотности. Установлено, что введение 10% минерального тонкодисперсного наполнителя, в виде кварцевого песка, способствует формированию субмикрокристаллических гидратных фаз, которые являются центрами гидратации, дополнительно связывающими отдельные зерна гранулированных заполнителей и уплотняющими структуру общей системы. Во всех образцах наблюдается формирование блочно-ритмической структуры, с присутствием отдельных блоков-агрегатов. Отмечается зарастание микроскопических пор мелкими кристаллическими новообразованиями гидросиликатов кальция. Выявлено, что структура гранулированных заполнителей, приготовленных на основе вяжущей композиции №1 (ВК-1) более плотная чем на портландцементе ПЦ 500-Д0-Н.

Ключевые слова: гранулированные заполнители, вяжущие композиции, микроструктура, гидратация, экструзия.

Введение. Современные направления научных исследований строительного материаловедения направлены на разработку экологически чистых материалов из некондиционного или отходного сырья различных отраслей промышленности. Безотходность производства – основная цель современной индустрии.

Сегодня одной из проблем производства строительных материалов является нехватка необходимых природных сырьевых материалов. Эффективное применение местного сырьевого строительного кластера и некондиционных материалов в строительном материаловедении позволяет повысить экономическую эффективность и улучшить экологическую обстановку территории.

В настоящее время имеется ряд научных разработок [1–6] по использованию производственных отходов в композиционных составах и подбора компонентов с целью повышения экологической безопасности и достижения оптимальных прочностных и технологических характеристик бетонов, ведутся разработки по созданию вяжущих композиций с улучшенным экономическим

эффектом [7–9], увеличивающих рост энергетических ресурсов в строительном производстве.

Производство бетонов и растворов на разных территориях подразумевает использование крупных заполнителей. Остаются нерешенными вопросы нехватки крупных и мелких природных заполнителей требуемых кондиций на том или ином участке территории, вследствие чего строительство объектов становится экономически нецелесообразным [9, 10]. Поиск новых крупных и мелких заполнителей требует разработки дополнительных природных ресурсов, осуществление которых ведет к нарушению природно-экологического баланса. Создание искусственных крупных и мелких заполнителей требуемых фракций на базе некондиционного сырья, для воспроизводства на любой территории нашей страны и мира в целом, является актуальной задачей научного сообщества.

Материалы и методы. Используемые материалы – портландцемент (ПЦ 500-Д0-Н), кварцевый песок (КП) фракций $\leq 0,16$; $\leq 0,315$; $\leq 0,63$ мм; вода (В) ГОСТ 23732-2011.

Формование ГЗ производилось на основе ПЦ 500-Д0-Н (ПЦ) и вяжущей композиции №1

(ВК-1). В свою очередь, ВК-1 получена путем совместного помола ПЦ=90 % и КП=10 % в вихревой струйной мельнице ВСМ-01 [11, 12].

Грануляция (экструзионное формование) КП производилась на автоматической шнековой установке Mystery MGM-3000 с мощностью 3000 Вт. В ходе исследования получены 6 видов гранулированных заполнителей (ГЗ) на основе ПЦ и ВК-1 и КП (фр. $\leq 0,16$; $\leq 0,315$; $\leq 0,63$ мм). Набравшие прочность в течение 28 суток в воздушно-влажных условиях ГЗ заформованы с цементным тестом (в пропорциях по массе ГЗ:ПЦ:В = 1:1:0,5) [11, 12] в образцы-кубы см. Подробная методология экструзионного формования ГЗ и проведения физико-механических испытаний на

сжатие образцов приведена в научно-исследовательских работах [11, 12].

Микроскопические снимки сколов образцов-кубов $3 \times 3 \times 3$ см, предварительно разрушенные на гидравлическом прессе ПГМ-50МГ4, выполнены на электронном микроскопе высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU.

Основная часть. Исследования проводили с целью определения зависимостей изменения микроструктур при гидратации в системе: вид вяжущего – фракция песка – прочность образцов. В ходе проведения испытаний образцов на сжатие выявлены наиболее перспективные образцы (табл. 1).

Таблица 1

Наиболее перспективные составы гранулированных заполнителей и их прочностные характеристики

№ п/п	Шифр образцов с ГЗ	Прочность при сжатии, МПа	
		Средняя	Максимальная
1	Гранулированные заполнители с ПЦ 500-Д0-Н		
1.1	0,16+10 % ПЦ	18,9	22,12
1.2	0,315+10 % ПЦ	19,78	21,57
1.3	0,63+15 % ПЦ	19,49	22,80
2	Гранулированные заполнители с ВК-1		
2.1	0,16+10 % ВК-1	19,47	20,88
2.2	0,315+10 % ВК-1	25,08	26,52
2.3	0,63+15 % ВК-1	25,23	26,32

Многогранность и сложность процессов гидратации при затвердевании компонентных растворов с ГЗ затрудняет объяснение поведения образцов в процессе испытаний при сжатии на гидравлическом прессе ПГМ-50МГ4. С целью изучения микроструктуры образцов выполнены микрофотографии сколов структуры ГЗ на микроскопе высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU.

Микрофотографии поверхностей сколов ГЗ с шифром 016+10 % ПЦ (рис. 1) свидетельствуют о плотном зарастании кристаллической массой. Поверхность скола ГЗ имеет блочно-ритмическую структуру. Кристаллы гидро-силикатов кальция, гидросульфаталюминатов кальция и гидроалюминатов кальция составляют основную массу беспорядочно ориентированных чешуйчатых поликристаллов [13]. На поверхности частиц заполнителя ГЗ наблюдается активное обрастание малыми игольчато-чешуйчатыми кристаллами. Срастание кристаллических чешуек образует местами плотную микроструктуру структуры ГЗ. Отчетливо просматриваются четыре вида ориентации кристаллообразований (рис. 1, в): первый – параллельно ориентированные иголь-

чатые кристаллы гидросиликатов кальция; второй – сросшиеся и параллельно направленные кристаллы гидроалюминатов и гидросульфаталюминатов кальция; третий – шестигранные призмы эттрингита или оксида кальция; четвертый – блоки из пакетов волокон гидросиликатов кальция. Свободное поровое пространство между частицами кварцевого песка в ГЗ создает благоприятные условия для развития мелкодисперсной кристаллической структуры.

Очевидно, что при высокой удельной поверхности кварцевых песков ($\leq 0,16$ мм) с малым добавлением портландцемента в ГЗ, зарастание поликристаллической структурой межчастичного пространства будет невысоким. Однако, при взаимодействии в компонентном составе смеси, ГЗ показывают себя как эффективный заполнитель.

Микроструктура поверхности скола ГЗ шифра 0,315+10 % ПЦ (рис. 2) свидетельствует о формировании блочно-ритмической структуры [14]. При увеличении 5 мм и 1000 мкм (рис. 2, а, б) наблюдается зернистая структура ГЗ, с наличием большого объема пор размерами от 0,3 до 0,5 мм. Снимок при увеличении 10 мкм (рис. 2, в)

констатирует о достаточном росте поликристаллов чешуйчатой формы, ориентированных в разных направлениях. Структурные единицы кри-

сталлических образований формируются в отдельные блоки-агрегаты. Замечено зарастание микроскопических пор мелкокристаллическими новообразования гидросиликатов кальция.

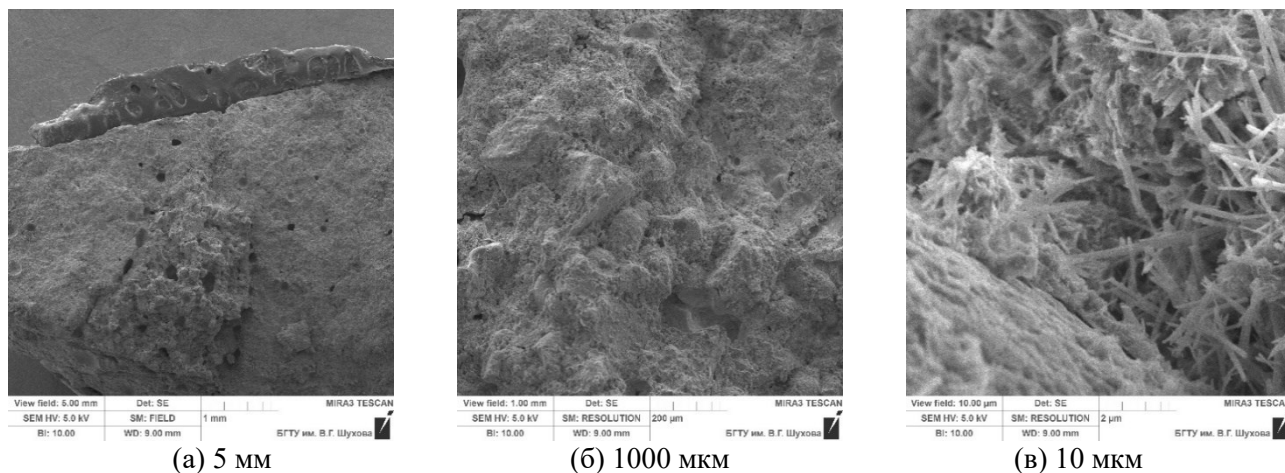


Рис. 1. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,16+10 % ПЦ

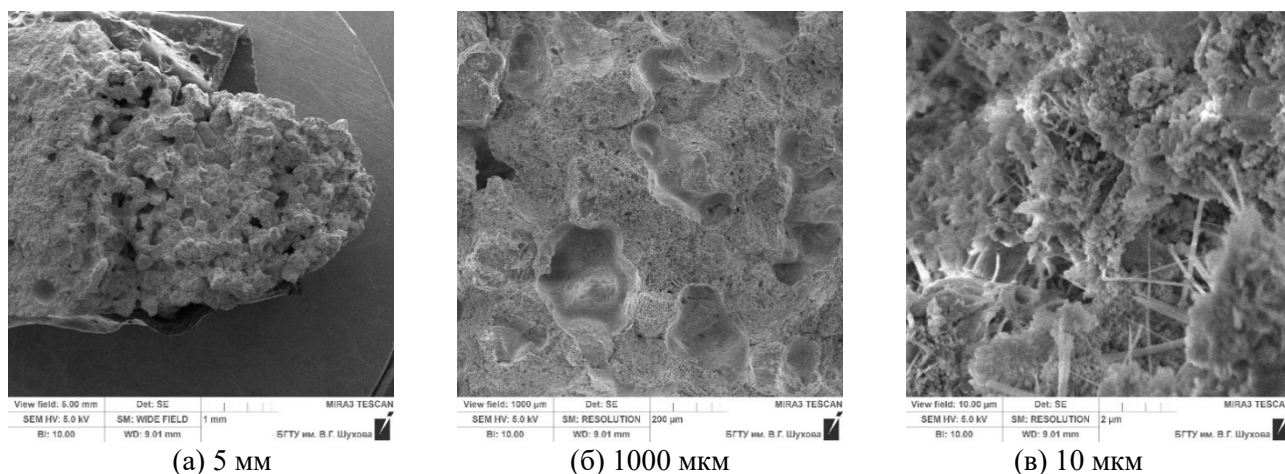


Рис. 2. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,315+10 % ПЦ

Микроструктура поверхности скола в области ГЗ шифра 0,63+15 % ПЦ (рис. 3) формируется из отдельных зерен кварцевого песка (фракцией зерен $\leq 0,63$ мм), обросших кристаллическими образованиями. Структура скола ГЗ – агрегатно-или блочно-ритмическая с образованием отдельных блоков-агрегатов из чешуйчатых поликристаллов [14, 15]. Необходимо отметить, что при формировании ГЗ (0,63+15 % ПЦ) комплектуется высокопористая структура с размерами пор от 0,3 до 0,6 мм (рис. 3, а, б). Стенки таких воздушных пор покрываются сплошной плотной пленкой новообразований, фильтрация воды через которую так же затруднена, как через основную плотную массу цементного камня. Наблюдается плотное зарастание кристаллоагрегатами (чешуйчатыми и призматическими поликристаллами) отдельных областей пор и первоначальных центров гидратации (рис. 3, в). Отчетливо видно, что в ходе

гидратации на частицах кварцевого песка формируются параллельно ориентированные слои пластинчато-чешуйчатых поликристаллов образованные из гидросиликатов кальция и алюминий содержащих минералов.

На рис. 4 приведены снимки микроструктуры сколов образцов в местах закладки ГЗ (0,16+10 % ВК-1). Структура ГЗ характеризуется, как агрегатно-ритмическая с формированием кристаллоагрегатов и кристаллических сростков [14, 16, 17]. Мезоструктура сколов (рис. 4, а, б) – мелкопористая с размерами пор от 0,01 до 0,1 мм и плотным обрастанием частиц кварцевого песка чешуйчатыми поликристаллами. Межчастичное пространство в ГЗ заполнено кристаллическими образованиями этtringита, гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Содержание этtringитовой фазы ослабляет структурную прочность ГЗ. Однако, плотное прорастание игольчато-

призматических кристаллов увеличивает физико-механические показатели системы при сжатии. В частности, обнаружены мелкодисперсные частицы наполнителя (кварцевого песка), введенные в компонентный состав в процессе получения вяжущей композиции. Частицы наполнителя в компонентном составе вяжущего являются подложками для создания гидратационных центров,

обрастающих плоскими чешуйчатыми поликристаллами. Ввод наполнителей в компонентный состав вяжущих увеличивает содержание субмикроструктурных гидратных фаз, которые дополнительно связывают частицы кварцевого песка (заполнителя) и уплотняют структуру ГЗ.

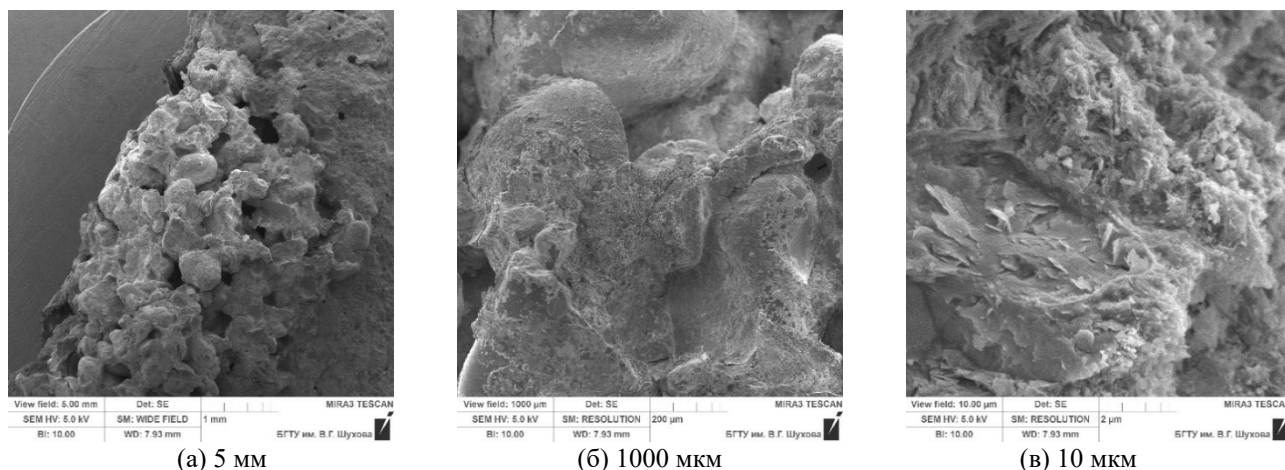


Рис. 3. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,63+15 % ПЦ

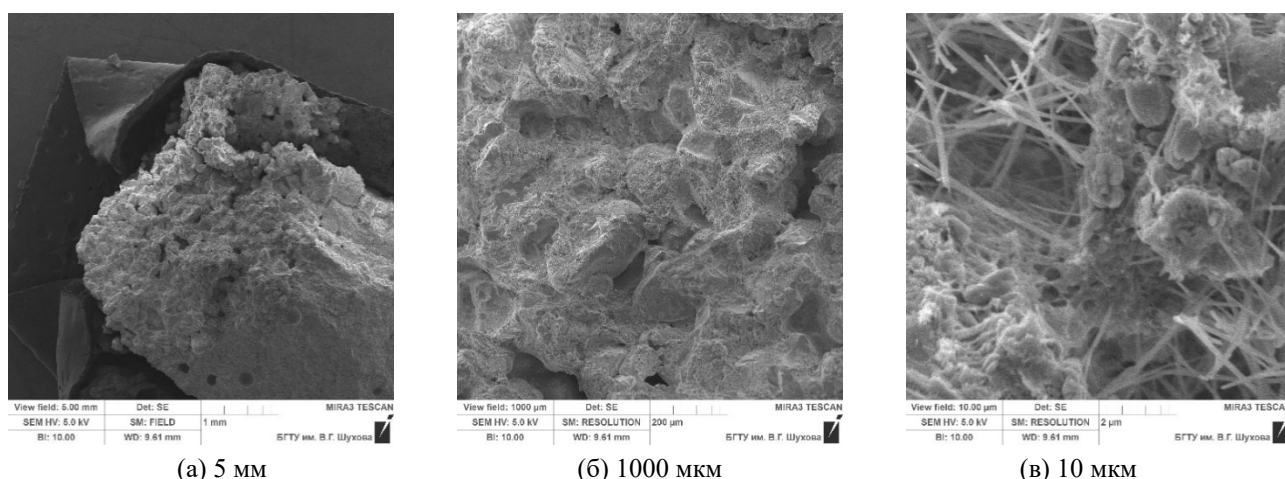


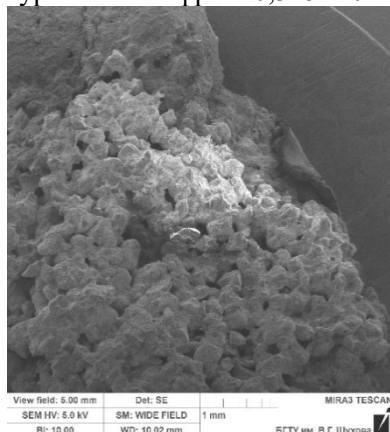
Рис. 4. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,16+10 % ВК-1

Микроструктура среза гранулированных заполнителей образца с шифром 0,315+10 % ВК-1 (рис. 5) образована из отдельных частиц заполнителя, связанных композиционным вяжущим ВК-1. ГЗ на основе ВК-1 имеет большое количество пор, размерами от 100 до 500 мкм. Структура формирования кристаллических образований характеризуется, как блочно-ритмическая с ориентацией чешуйчатых поликристаллов в разных направлениях [13]. По нашему мнению, наличие 10 % наполнителя в композиционном составе вяжущего увеличивает содержание субмикроструктурных гидратных фаз, которые могут являться центрами гидратации, допол-

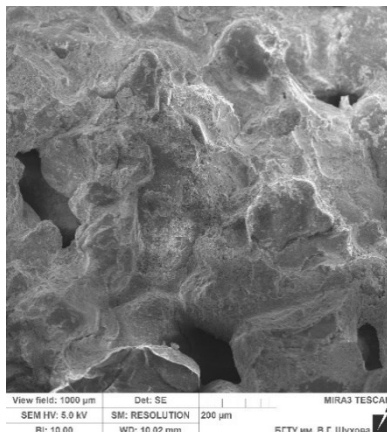
нительно связывать отдельные зерна гранулированных заполнителей и уплотнять структуру общей системы. Четко просматривается несколько видов формирования кристаллов (рис. 5, в): пластинчатых (чешуйчатых), образовавшихся при гидратации двухкальцевого (C_2S) и трехкальцевого (C_3S) силикатов; беспорядочно ориентированных игольчатых кристаллов гидросульфаталюминатов кальция ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$) и гидросиликатов кальция; гексагональных пластинчатых кристаллов, формирующихся при гидратации четырехкальцевого алюмоферрита (C_4AF). Наблюдается застание поровых объемов игольчатыми

кристаллическими новообразованиями. Структура ГЗ с шифром 0,315+10 % ВК-1 отличается

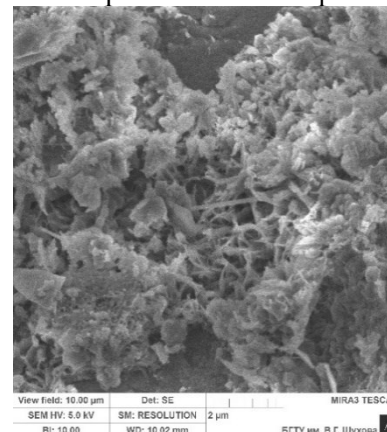
достаточно плотной компоновкой зерен заполнителя и блоков-агрегатов кристаллической фазы.



(а) 5 мм



(б) 1000 мкм

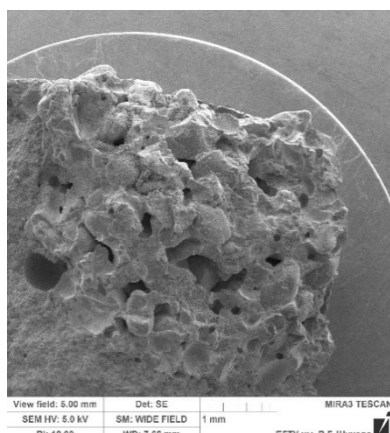


(в) 10 мкм

Рис. 5. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,315+10 % ВК-1

На рис. 6 приведены микрофотографии поверхности скола ГЗ с шифром 0,63+15 % ВК-1. Микроскопические снимки свидетельствуют о наличии пористой структуры ГЗ с размерами пор от 0,05 до 0,7 мм. Структура поверхности скола ГЗ (рис. 6, в) агрегатно- или блочно-ритмическая с разно-ориентированными блоками параллельных чешуйчатых поликристаллов. Ориентация слоев ограничивается размерами блока. Параллельная слоистость на одних участках выявляется очень четко, на других менее четко, на третьих не выявляется. В одних блоках слои состоят

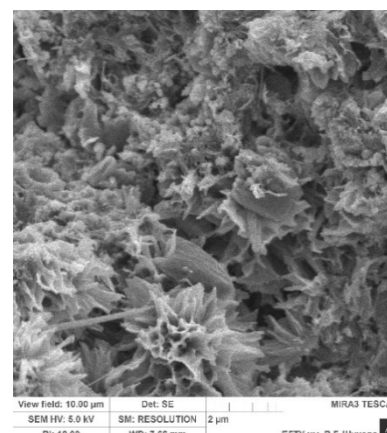
из параллельно ориентированных сросшихся пластинчатых кристаллов гидроалюмоферритов и моносulfогидроалюминатов кальция, в других из параллельно сросшихся шестигранных призм, в-третьих из пакетов волокон и иголок гидросиликатов кальция. Концентрическое расположение разноориентированных слоев кристаллов наглядно показывает ритмичность микроструктуры [18], обусловленной высокой удельной поверхностью вяжущей композиции, полученной в вихревой струйной мельнице.



(а) 5 мм



(б) 100 мкм



(в) 10 мкм

Рис. 6. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,63+15 % ВК-1

Известно, что на процесс кристаллизации влияют даже малые дозы примесей, поэтому с высокой точностью нельзя утверждать о каком-либо структурообразовании (кристаллизации) системы с портландцементом. Микроструктурный анализ определил некоторые закономерности и показал значительные изменения в формировании кристаллических фаз с использованием разных ГЗ. Изучение микроструктуры наглядно

подтвердило полученные результаты физико-механических исследований.

Выводы

1. Процесс структурообразования в различных видах ГЗ имеет свои особенности, которые обусловлены применением кварцевого песка той или иной дисперсности, видом вяжущего компонента, его процентным содержанием, водовязущим отношением.

2. Проведенные исследования позволили установить влияние изменения дисперсности применяемых вяжущих композиций (ВК-1) в сравнении с товарным портландцементом (ПЦ 500-Д0-Н) на физико-механические показатели образцов, эти изменения аналогичным образом отражаются на формировании микроструктуры ГЗ, при применении ВК-1 кристаллическая структура более густая и однородная.

3. Установлено, что высокие физико-механические показатели образцов подтверждаются высокой степенью зарастания микроструктуры кристаллами гидросиликатов и гидроалюминатов кальция на мелкодисперсных зернах минерального наполнителя. Прочность ГЗ на основе ПЦ находится в диапазоне от 18,9 до 19,78 МПа, а прочностные показатели ГЗ на основе ВК-1 распределяются в пределах от 19,47 до 25,23 МПа, что позволяет рекомендовать их в качестве заполнителей для строительных растворов.

Источник финансирования. РФФИ научно-исследовательского проекта № 18-29-24113 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aljasimee D.H., Dhaheer M.S.A. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating PVA-treated recycled aggregate // *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 671. 012103.
2. Cabrera-Covarrubias F., Gomez-Soberon J.M., Almaral-Sanchez J.L., Arredondo-Rea S.P., Gomez-Soberon M.C., Corral-Higuera R. An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of the Stress-Strain // *Materials*. 2016. Vol. 9, № 12. 1029.
3. Palovčík J., Opravil T., Novotný R., Másilko J. Application of brick grind dust in systems based on Portland cement // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 379. 012002.
4. Shapovalov N.A., Shchekina A. Yu., Gorodov A.I. Modified binders on the basis of flotation tailings // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 327. 032050.
5. Tchamdjou W.H.J., Grigoletto S., Michel F., Courard L., Abidi M.L., Cherradi T. An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in Portland cement mortar // *Case Studies in Construction Materials*. 2017. Vol. 7. Pp. 191–206.
6. Thomas C., Cimentada A.I., Cantero B., Saez del Bosque I.F., Polanco J.A. Industrial Low-Clinker Precast Elements Using Recycled Aggregates // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 19. 6655.
7. Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Чепенко А.С. Особенности процессов гидратации высокодисперсных вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 12. С. 105–113.
8. Yüksel I., Genç A. Properties of Concrete Containing Nonground Ash and Slag As Fine Aggregate // *ACI Materials Journal*. 2007. Vol. 37. 8.
9. Miller S.A. The role of cement service-life on the efficient use of resources // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15, № 2. 024004.
10. Courard L., Rondeux M., Zhao Z., Michel F. Use of Recycled Fine Aggregates from C&DW for Unbound Road Sub-Base // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 13. 2994.
11. Zagorodnyuk L.H., Ryzhikh V.D., Makhortov D.S., Sumskoy D.A. Method of Extrusion Granulation of Aggregates for the Preparation of Filling Mixtures // *Innovations and Technologies in Construction*. Cham: Springer International Publishing. 2021. Vol. 151. Pp. 22–28.
12. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Ryzhikh V., Lesovik R., Fediuk R., Vatin N., Karelina M. Granular Aggregates Based on Finely Dispersed Sub-standard Raw Materials // *Crystals*. 2021. Vol. 11, № 4. 369.
13. Feng Y. Hydration and strength development in blended cement with ultrafine granulated copper slag // *PLoS ONE* ed. Pimraksa K. 2019. Vol. 14, № 4. e0215677.
14. Wu J., Wang L., Meng L. Analysis of mineral composition and microstructure of gravel aggregate based on XRD and SEM // *Road Materials and Pavement Design*. 2017. Vol. 18, № 3. Pp. 139–148.
15. An J., Kim S.S., Nam B.H., A. Durham S. Effect of Aggregate Mineralogy and Concrete Microstructure on Thermal Expansion and Strength Properties of Concrete // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7, № 12. 1307.
16. Zitouni K., Djerbi A., Mebrouki A. Study on the Microstructure of the New Paste of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 9. 2114.
17. Rao M., Wei J., Gao Z., Zhou W., Li Q., Liu S. Study on Strength and Microstructure of Cement-Based Materials Containing Combination Mineral Admixtures // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–10.
18. Hodul J., Žižková N., Borg R.P. The Influence of Crystalline Admixtures on the Properties and Microstructure of Mortar Containing By-Products // *Buildings*. 2020. Vol. 10, № 9. 146.

Информация об авторах

Загороднюк Лилия Хасановна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: LHZ47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рыжих Владислав Дмитриевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сумской Дмитрий Алексеевич, ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Синебок Дарья Александровна, магистрант кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: rd_work00@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.04.2021 г.

© Загороднюк Л.Х., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Синебок Д.А., 2021

Zagorodnyuk L.Kh., *Ryzhikh V.D., Sumskoy D.A., Sinebok D.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46

**E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru*

FEATURES OF THE FORMATION OF THE MICROSTRUCTURE OF GRANULAR AGGREGATES ON DIFFERENT BINDING COMPOSITIONS

Abstract. *This work includes a study of the microstructure of granular aggregates prepared on various binding compositions. The presented work includes three parts devoted to the analysis of the microstructures of granular aggregates taking into account the change in the percentage of the mineral filler in binding compositions. The article deals with the main aspects of the formation of the structure of granular aggregates during the hydration of Portland cement (PC 500-D0-N) and a binder composition (PC 500-D0-N + 10 % quartz sand) prepared in a vortex jet mill. The main regularities of the influence and dispersion of quartz mineral filler (fractions ≤ 0.16 ; ≤ 0.315 ; ≤ 0.63 mm) on structure formation during the hydration of binding components differing in the composition and particle dispersion are revealed. The paper analyzes physical and mechanical tests of the most promising samples with a study of their microstructure features. The study of the sample microstructures reveals the general regularities of the growth of crystalline phases of different densities. It is established that the introduction of 1 0% mineral fine-dispersed filler, in the form of quartz sand, contributes to the formation of sub-microcrystalline hydrate phases, which are centers of hydration, additionally binding individual grains of granular aggregates and compacting the structure of the overall system. In all samples, the formation of a block-rhythmic structure is observed, with the presence of individual block-aggregates. There is an overgrowth of microscopic pores with small crystalline neoplasms of calcium hydrosilicates. It is revealed that the structure of granular aggregates prepared on the basis of binder composition No. 1 (BK-1) has higher density than on Portland cement PC 500-D0-N.*

Keywords: *granulated fillers, binding compositions, microstructure, hydration, extrusion.*

REFERENCES

1. Aljasimee D.H., Dhaheer M.S.A. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating PVA-treated recycled aggregate. *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 671. 012103.
2. Cabrera-Covarrubias F., Gomez-Soberon J.M., Almaral-Sanchez J.L., Arredondo-Rea S.P., Gomez-Soberon M.C., Corral-Higuera R. An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of the Stress-Strain. *Materials*. 2016. Vol. 9, No. 12. 1029.
3. Palovčík J., Opravil T., Novotný R., Másilko J. Application of brick grind dust in systems based on Portland cement. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 379. 012002.
4. Shapovalov N.A., Shchekina A. Yu., Gorodov A.I. Modified binders on the basis of flotation tailings. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 327. 032050.
5. Tchamdjou W.H.J., Grigoletto S., Michel F., Courard L., Abidi M.L., Cherradi T. An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in Portland cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*. 2017. Vol. 7. Pp. 191–206.
6. Thomas C., Cimentada A.I., Cantero B., Saez del Bosque I.F., Polanco J.A. Industrial Low-Clinker Precast Elements Using Recycled Aggregates. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 19. 6655.
7. Zagorodnyuk L.H., Sumskoy D.A., Chepenko A.S. Features of the processes of hydra-

tion of highly dispersed binders [Osobennosti processov gidratatsii vysokodispersnyh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 12. Pp. 105–113. (rus)

8. Yüksel I., Genç A. Properties of Concrete Containing Nonground Ash and Slag As Fine Aggregate. *ACI Materials Journal*. 2007. Vol. 37. 8.

9. Miller S.A. The role of cement service-life on the efficient use of resources. *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15, No. 2. 024004.

10. Courard L., Rondeux M., Zhao Z., Michel F. Use of Recycled Fine Aggregates from C&DW for Unbound Road Sub-Base. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 13. 2994.

11. Zagorodnyuk L.H., Ryzhikh V.D., Makhortov D.S., Sumskey D.A. Method of Extrusion Granulation of Aggregates for the Preparation of Filling Mixtures. *Innovations and Technologies in Construction*. Cham: Springer International Publishing. 2021. Vol. 151. Pp. 22–28.

12. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Ryzhikh V., Lesovik R., Fediuk R., Vatin N., Karelina M. Granular Aggregates Based on Finely Dispersed Sub-standard Raw Materials. *Crystals*. 2021. Vol. 11, No. 4. 369.

13. Feng Y. Hydration and strength development in blended cement with ultrafine granulated

copper slag. *PLoS ONE* ed. Pimraksa K. 2019. Vol. 14, No. 4. e0215677.

14. Wu J., Wang L., Meng L. Analysis of mineral composition and microstructure of gravel aggregate based on XRD and SEM. *Road Materials and Pavement Design*. 2017. Vol. 18, No. 3. Pp. 139–148.

15. An J., Kim S.S., Nam B.H., A. Durham S. Effect of Aggregate Mineralogy and Concrete Microstructure on Thermal Expansion and Strength Properties of Concrete. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7, No. 12. 1307.

16. Zitouni K., Djerbi A., Mebrouki A. Study on the Microstructure of the New Paste of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 9. 2114.

17. Rao M., Wei J., Gao Z., Zhou W., Li Q., Liu S. Study on Strength and Microstructure of Cement-Based Materials Containing Combination Mineral Admixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–10.

18. Hodul J., Žižková N., Borg R.P. The Influence of Crystalline Admixtures on the Properties and Microstructure of Mortar Containing By-Products. *Buildings*. 2020. Vol. 10, No. 9. 146.

Information about the authors

Zagorodnyuk, Liliya Kh. DSc, Professor. E-mail: LHZ47@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ryzhikh, Vladislav D. Postgraduate student. E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sumskey, Dmitry A. Assistant. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sinebok, Darya A. Master student. E-mail: rd_work00@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 09.04.2021

Для цитирования:

Загороднюк Л.Х., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Синебок Д.А. Особенности формирования микроstructures гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 28–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-28-35

For citation:

Zagorodnyuk L.Kh., Ryzhikh V.D., Sumskey D.A., Sinebok D.A. Features of the formation of the microstructure of granular aggregates on different binding compositions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. No. 5. Pp. 28–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-28-35

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-36-49

Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В.Государственный университет по землеустройству***E-mail: LizaSh-Sh@list.ru*

РЕКОНСТРУКЦИЯ ВАЛДАЙСКОГО ИВЕРСКОГО, СПАСО-ПРИЛУЦКОГО, И КИРИЛЛО-БЕЛОЗЕРСКОГО МОНАСТЫРЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ПАЛОМНИЧЕСТВА И ТУРИЗМА

Аннотация. Развитие православных монастырей на севере России сталкивается с трудностями, обусловленными увеличением числа паломников и туристов, а также восстановлением традиционных и появлением новых функций, осуществляемых монастырскими комплексами. Сформулированные ранее четыре основных принципа реконструкции и развития православных монастырских комплексов Русского Севера позволяют разработать конкретные рекомендации по реконструкции и развитию монастырей. В настоящей работе эти рекомендации разработаны и применены для Валдайского Иверского, Спасо-Прилуцкого, и Кирилло-Белозерского монастырей, существенно отличающихся как по степени сохранности, так и по осуществляемым ими функциям. Разработанные рекомендации относятся к организации генеральных планов монастырских комплексов, а также к зданиям, входящим в состав главных функциональных групп этих монастырей. Во всех рассматриваемых в работе монастырях применение этих рекомендаций приведет к формированию доступной многофункциональной архитектурно-пространственной среды. Такая среда обеспечивает оптимальное зонирование монастырской территории, сохраняет архитектурный ансамбль данного монастырского комплекса и окружающий его природный ландшафт и создает наилучшие условия для насельников и посетителей монастыря. Предложенный в работе подход планируется развить и применить к ряду других монастырей Русского Севера.

Ключевые слова: православные монастыри, Русский Север, паломники и туристы, реконструкция и развитие, генеральный план, архитектурно-пространственная композиция.

Введение. Возрождение интереса к православию в нашей стране, начавшееся еще в конце 80-х годов XX в., привело к значительному увеличению количества людей, посещающих православные монастыри. В последние десятилетия число посетителей, ежегодно приезжающих в такие широко известные монастыри, как Соловецкий или Валаамский, исчисляется десятками тысяч [1].

Посетителей монастырей можно разделить на две основные категории: паломники и туристы. Паломничество представляет собой путешествие верующих к святым местам с целью поклонения и молитвы. Считается, что паломнический туризм в современной России возродился в год тысячелетия крещения Руси. Действительно, именно в 1988 г. отдельные храмы г. Москвы стали организовывать первые паломнические поездки в вновь открывшуюся Оптину пустынь, Толгский монастырь и другие обители [2]. Туристы посещают монастыри с экскурсионно-познавательными целями. Их интересует архитектура и история монастырских комплексов, художественные ценности монастырских музеев, природные красоты окружающих монастырь территорий и т.д. [3].

Очевидно, что присутствие на территории монастыря большого числа посторонних людей,

посещающих его с различными целями, может существенно осложнить жизнь и служение постоянно проживающих в монастыре монахов и насельников [4, 5]. Кроме того, увеличение числа посетителей требует и развития необходимой инфраструктуры: гостиниц, пунктов питания, автостоянок, помещений для экспонирования хранящихся в монастырях художественных ценностей, церквей, которые могли бы вместить большое количество паломников, и т.д. В настоящее время большинство российских монастырей не справляется со всем комплексом обозначенных здесь проблем. Особенно тяжелая ситуация складывается в связи с увеличением числа паломников и туристов в монастырях Русского Севера (см. работу [5]). Очевидно, что решение проблем, вызванных увеличением числа посетителей, может быть найдено лишь в рамках комплексного подхода, основную роль в котором должны играть архитектурные методы.

Однако в настоящее время существует лишь небольшое число работ, посвященных вопросам реконструкции и развития православных монастырских комплексов в современных условиях. Большинство работ по монастырям Русского Севера посвящено их истории или описанию архитектуры. Наиболее известными работами такого рода являются работы И.Л. Бусевой-Давыдовой

[6], W.C. Brumfield [7-9], митрополита Иллариона (Г. В. Алфеева) [10], Г. Штриккера [11] и др.

Современная реабилитация монастырей Вологодской области была исследована И.К. Белоярской [12–14]. В работе [12] было показано, что за последние десятилетия не произошло существенных изменений в функциональном использовании монастырей. Многие современные функции монастырских комплексов не только не соответствуют архитектурно-планировочной структуре и композиционной организации монастырского ансамбля, но и губительно сказываются на состоянии зданий [12]. В работах [12, 13] были выделены шесть различных групп современного использования православных монастырей: 1) использование в качестве исторических и краеведческих музеев; 2) размещение в монастырях учреждений системы исполнения наказаний; 3) использование в качестве закрытых лечебных учреждений; 4) использование в качестве других учреждений (колледжей, военных училищ, фабрик и т.д.); 5) размещение в зданиях монастырей складов, гаражей, и фермерских хозяйств; 6) возвращение монастырям их первоначальной функции. И. К. Белоярская разработала ряд принципов архитектурно-градостроительной реконструкции монастырей Русского Севера. Прежде всего, эти принципы учитывают ценностные характеристики данного монастыря (историческую, архитектурно-эстетическую и др.), его градостроительное положение и степень сохранности.

С. В. Ильвицкая исследовала архитектуру православных монастырских комплексов ряда балканских стран и России (см. работы [15–17] и ссылки в них). Работы автора позволили выявить закономерности развития архитектурной типологии на базе изучения значительного объема теоретических и практических данных по формированию архитектуры православных монастырских комплексов и разработать концепцию современного монастыря как открытой системы для развития традиционных и новых видов деятельности. С. В. Ильвицкая впервые разработала классификационные признаки монастырей, которые объединяются в четыре группы: функциональные, церковно-канонические, ландшафтно-территориальные, и архитектурно-композиционные, положенные в основу типологии. Автором предложены следующие социально-функциональные типы монастырей: монастыри-крепости, монастыри-мемориалы, монастыри-резиденции и монастыри-музеи. Для каждого типа определены их характерные функции, среди которых есть и сравнительно новые – музейная, социально-образовательная, издательская и туристско-паломни-

ческая. Предложенная автором адаптивная архитектура исторических монастырских комплексов позволяет соответствовать духовным потребностям паломников, и одновременно обеспечить их комфортное пребывание в монастыре. Более того, С. В. Ильвицкой разработана универсальная структурно-функциональная прогностическая модель православного монастыря с взаимосвязанными функциональными зонами и дворовой структурой [15], которая легла в основу научно-практической реконструкции существующих и строительства новых православных монастырей, как в балканских странах, так и в России.

Л. А. Федотова анализирует проблемы функционирования православных монастырей в современных условиях увеличения паломничества и обобщает российский и зарубежный опыт архитектурной организации объектов паломнического туризма [18–20]. В работе [18] автором была разработана концепция исторического комплекса паломнического туризма, представляющего собой систему взаимосвязанных зданий и сооружений, которые находятся в территориальной доступности друг относительно друга. Исследование было проведено на основе монастырей Коломенского района Московской области [18–19]. В работе [18] была также предложена модель паломнической гостиницы и разработана типология гостиничных номеров.

Наконец, в недавней статье авторов [5] предложены и обоснованы четыре общих принципа, которые должны лежать в основе проектов реконструкции православных монастырей Русского Севера. Эти принципы направлены на решение проблем, связанных с восстановлением традиционных и появлением новых функций монастырских комплексов в современных условиях резкого увеличения числа паломников и туристов. К сформулированным в работе [5] принципам относятся: принцип разделения монастырского комплекса на функциональные зоны, принцип максимальной доступности территорий и зданий монастырских комплексов лицам с ограниченными возможностями, принцип сохранения и восстановления объемно-пространственной композиции архитектурного ансамбля, и принцип сохранения и использования природного ландшафта монастырских территорий. Кроме того, в статье [5] приведен ряд примеров, иллюстрирующих применение этих принципов к нескольким монастырям Русского Севера. Рассмотренные примеры показали, что при разработке проекта реконструкции данного конкретного монастыря нецелесообразно пытаться одновременно комплексно применить предложенные принципы. Вместо этого необходимо определить

те из них, которые будут способствовать решению актуальных проблем реконструируемого монастыря. Предложенные в исследовании [5] принципы позволяют разработать конкретные рекомендации по реконструкции православных монастырей севера России с учетом современных условий. Эти рекомендации в первую очередь касаются реорганизации генеральных планов монастырских комплексов и архитектурных решений облика зданий основных функциональных групп.

Можно заметить, что аналогичные рекомендации до сих пор еще не были предложены ни по одному из наиболее известных монастырей Русского Севера. Поэтому целью настоящей работы является разработка и обоснование детальных предложений по развитию трех широко известных и активно посещаемых монастырских комплексов: Валдайского Иверского [21, 22], Спасо-Прилуцкого [23, 24], и Кирилло-Белозерского [25]. Эти три православных монастыря являются основными объектами исследования настоящей работы. Выбор данных монастырей не случаен. Как объемно-пространственные композиции этих монастырей в целом, так и их отдельные здания, дошли до наших дней в разной степени сохранности. Кроме того, отличается и набор функций, осуществляемый этими монастырями в настоящее время.

Отреставрированный сравнительно недавно (2004-2008 гг.) Валдайский Иверский монастырь является примером восстановления архитектурного комплекса, дошедшего до настоящего времени с существенными утратами зданий и значительными искажениями сохранившихся построек: завершений церквей, проемов, и деталей фасадов. Отличительной особенностью вновь открытого в 1991 г. Спасо-Прилуцкого монастыря является большое количество осуществляемых в нем функций. Действительно, для многих восстанавливаемых монастырей Русского Севера основной задачей реконструкции является формирование архитектурной среды, которая необходима для воссоздания исторически сложившихся и реализации новых функций. В то же время, обладающий сравнительно небольшой площадью (менее 5 га) Спасо-Прилуцкий монастырь перегружен новыми функциями. Особенностью развития Кирилло-Белозерского монастыря является то обстоятельство, что его монастырская община владеет территорией монастыря совместно со светской организацией – Кирилло-Белозерским историко-архитектурным и художественным музеем-заповедником (КБИАХМЗ). Из-за необходимости сохранения музейных ценностей, основная часть зданий этого монастыря не может быть передана общине. Таким образом, сделан-

ный в данной работе выбор монастырских комплексов позволяет наиболее полным образом проанализировать применение сформулированных в работе [5] архитектурных принципов.

Основные задачи данного исследования определяются поставленной целью. Поэтому, к задачам работы относятся: 1) определение тех принципов, которые позволяют решить проблемы каждого из рассматриваемых монастырей, 2) обоснование предлагаемых рекомендаций по генеральным планам и зданиям главных функциональных групп, и 3) анализ результатов, к которым приведет воплощение этих рекомендаций.

Методология. Очевидно, что решить поставленные в работе задачи возможно лишь на основе комплексного подхода, учитывающего исторический и современный опыт воссоздания православных монастырских комплексов. Поэтому в данной работе были использованы различные методы исследования, к числу которых относятся: 1) изучение исторических и проектных документов по архитектурной организации каждого из рассматриваемых в работе монастырей; 2) анализ функций, реализуемых монастырскими комплексами; 3) анализ результатов реставрационных работ, выполненных в рассматриваемых монастырях к настоящему времени; 4) оценка результатов, которые будут получены при воплощении предлагаемых в работе рекомендаций.

Основная часть. Валдайский Иверский монастырь. Первым из рассматриваемых в настоящей работе монастырей является Валдайский Иверский Богородицкий Святоозерский мужской монастырь, который расположен на Сельвицком острове Валдайского озера, в 10 км от города Валдай. Валдайский Иверский монастырь – один из трех монастырей, основанных Патриархом Никоном в XVII в [21]. Центральная часть этого монастыря, состоящего из трех дворов, представляет собой первоначальную территорию обители, сформировавшейся к середине XVIII в. Здесь сохранились Успенский собор (1656 г.), церковь Богоявления Господня (1659 г.) с трапезной палатой, надвратная церковь во имя Архистратига Михаила (1657-1659 гг.). Здесь же расположены построенные в XVII в. наместнический, настоятельский, казначейский и братский корпуса, а также колокольня. Второй (западный) двор имел первоначально хозяйственное значение. На нем располагались хозяйственные постройки и конюшни. В начале XVIII в. к северо-западу от комплекса зданий монастыря построены больничный корпус с церковью Иакова Боровичского и каменная монастырская ограда с

башнями. Внутренняя ограда отделила от основной территории погост, располагающийся на восточном дворе монастыря.

В XIX в. в монастырском комплексе проводились масштабные работы по его расширению. При этом первоначальная территория осталась жилой зоной монахов и сакральной церковной зоной. В это время осваивается территория перед главным входом в монастырь, строится вторая надвратная церковь Филиппа Митрополита. Южная половина западного каре использовалась для обслуживания паломников, а северная представляла собой хозяйственный двор. Таким образом, монастырь разделен на функциональные зоны, удобные для того периода его существования. После закрытия монастыря в 1927 г. на его территории размещались музей краеведения и мастерские. Во время Великой Отечественной войны в монастыре находился госпиталь, дом инвалидов и база отдыха.

Возрождение обители началось в 1997 г. В результате реставрационных работ здания XVII в. (церкви и келейные корпуса), получили их первоначальное приспособление. Единственное исключение составил Казначейский корпус, в который поселили монастырских трудников, т.е., людей, работающих при монастыре на добровольной и бескорыстной основе. Удачными решениями реставрационных работ необходимо признать создание жилья для посетителей и монастырского музея. В возрождающемся монастыре уделяется большое внимание проблеме создания жилья для паломников и туристов. Здания западного каре, т.е. Гостиные, Странноприимный, и Конюшенный корпуса, реконструированы с приспособлением под монастырские гостиницы. Сохранившиеся угловые башни уже несущей оградой XVII в. включены в гостиничный комплекс, а их интерьеры используются в качестве холлов-гостиных. Гостиничный комплекс располагает разнообразными номерами, что позволяет обслуживать разные группы посетителей. Так, например, предусмотрены номера для семейных и одиноких гостей. Монастырь располагает жильем, необходимым для приема паломнических групп автобусных туров. Самая большая и наиболее сильно разрушенная Никоновская башня воссоздана по архивным изображениям и приспособлена под музей. Это удачный пример нового приспособления памятника архитектуры под современные нужды, который может быть использован и при возрождении других монастырей.

Неудачей при организации жилой зоны посетителей следует признать приспособление под гаражи бывших конюшен (конюшенного кор-

пуса), располагающихся в западном каре монастыря. Действительно, гараж с автостоянкой нарушает покой постояльцев гостиниц. Это необходимо учесть при разработке концепций развития монастырей путем четкого разделения территории и зданий монастыря на функциональные зоны. При реставрации Никоновской башни допущена такая же ошибка – нарушение четкости в зонировании территории. Вход в музей запланирован со стороны участка, на который выходят окна Братского корпуса. В результате поток посетителей музея проходит под окнами келий. Этого легко можно избежать, расположив вход в музей на противоположном фасаде, со стороны зоны туристов. Эти проблемы предлагается устранить при следующих реставрационных работах в Валдайском Иверском монастыре.

Поэтому в настоящей работе предлагается более четко следовать принципу разделения территории на функциональные зоны при дальнейшем развитии монастыря. Эта цель может быть достигнута путем изменения приспособления зданий. Действительно, приспособление конюшенного корпуса под паломническую гостиницу в жилой зоне паломников и туристов, а также приспособление банного корпуса на хозяйственном дворе трапезной под гараж позволит восстановить соответствие помещений функциональным зонам монастырской территории. Принципу разделения территории монастыря на функциональные зоны отвечает и предлагаемый в настоящей работе перенос входа Никоновской башни с ее восточного на западный фасад, т.е. на сторону зоны обслуживания паломников и туристов. Перенос входа Никоновской башни приведет к тому, что поток посетителей музея не будет проходить под окнами келий трудников, располагающихся в бывшем Казначейском корпусе. Кроме того, предлагаемые здесь изменения не противоречат принципу сохранения и восстановления объемно-пространственной композиции архитектурного ансамбля монастыря. Эти изменения не меняют очертаний плана, силуэтов самих зданий и не искажают северной панорамы монастыря, с которой просматриваются эти здания. Предлагаемый перенос входа в музей является обоснованным и с точки зрения принципа сохранения и использования природного ландшафта монастырских территорий, т.к. такой перенос позволит предотвратить уничтожение газонов и сохранить группу берез, возраст которых составляет более пятидесяти лет.

Для того, чтобы завершить сложившееся разделение территории монастыря на зоны посетителей и монастырской братии, следует создать внутренние ограждения территории. Эти ограждения, которые могут быть как металлическими,

так и каменными, окончательно выделяют территорию, предназначенную только для насельников монастыря. Важно отметить, что у предлагаемых оград нет функции визуального отделения. Они должны позволить паломникам и туристам осматривать монастырские постройки без доступа к зданиям братских корпусов.

После возведения внутренних ограждений каждые ворота в Валдайском Иверском монастыре будут иметь строго определенную функцию. В результате, в монастыре станет возможен следующий экскурсионный маршрут: посетители монастыря проходят оба надвратных храма, осматривают Иверский собор и церковь Богоявления, возвращаются на западную часть территории и посещают монастырский музей. Затем, вы-

ходя через северные ворота и следуя вдоль внешних монастырских стен, они осматривают ограду монастыря, церковь Святого Праведного Иакова Боровичского с больничными кельями и северо-восточную башню XVII в. снаружи, т.е. не входя в здания. В то же время, южные и северные хозяйственные ворота целесообразно использовать только для нужд монастыря.

Предложения по развитию Валдайского Иверского монастыря, разработанные в настоящей работе, показаны на схеме генерального плана монастыря, рис. 1. Реализация этих предложений позволит осуществить более четкое разделение территории монастыря на функциональные зоны, и приведут к более удобному, как насельникам, так и гостям, обустройству Валдайского Иверского монастыря.

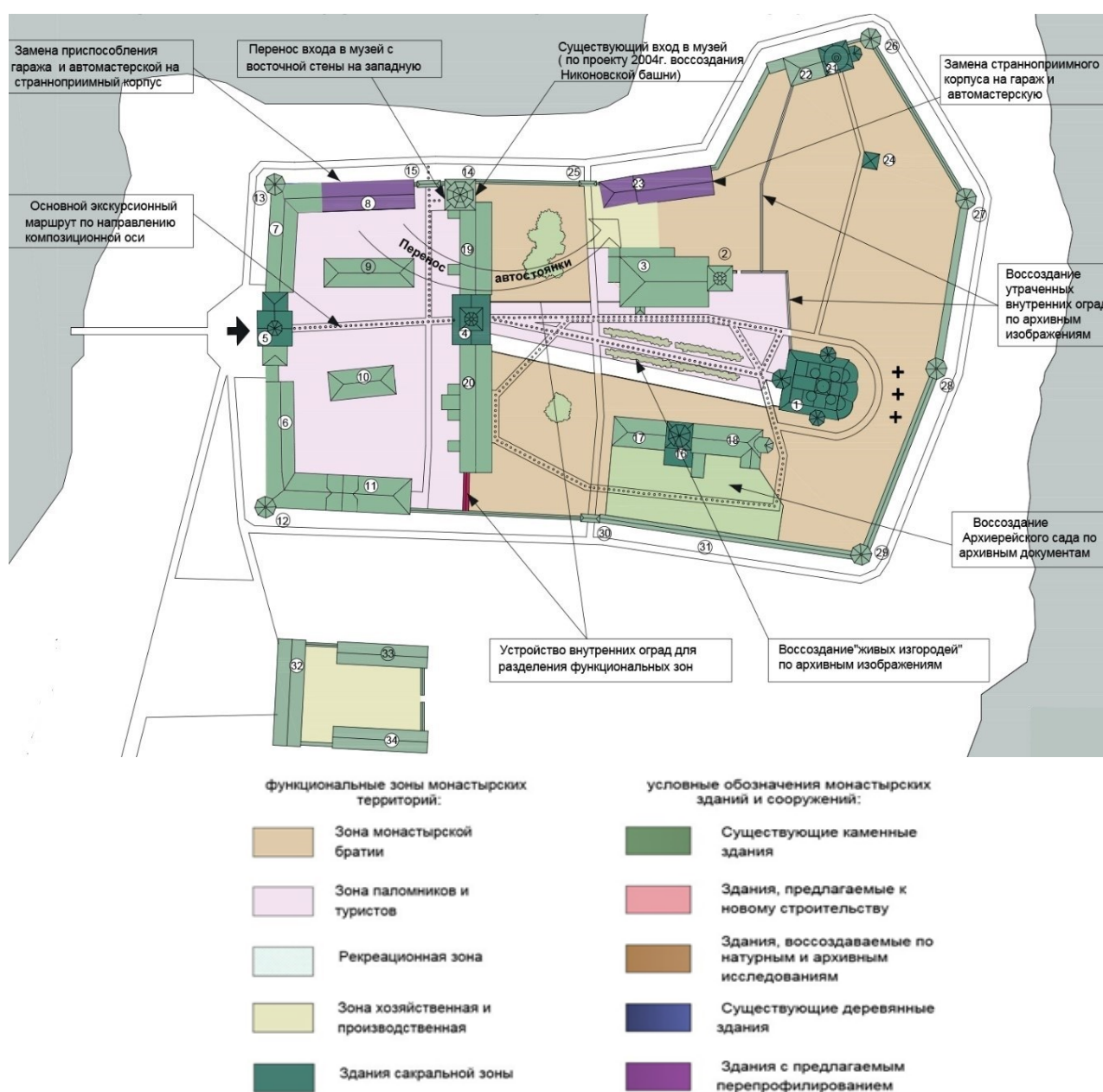


Рис. 1. Генеральный план и предложения по реконструкции и развитию Валдайского Иверского монастыря

Спасо-Прилуцкий монастырь. В действующих зданиях Спасо-Прилуцкого монастыря очевиден недостаток помещений, предназначенных для студентов Вологодского духовного училища, а также помещений, необходимых для обслуживания посетителей монастыря. Кроме того, на монастырской территории постоянно пересекаются потоки монастырской братии, студентов училища, и посетителей. Очевидно, что сокращение количества функций, осуществляемых Спасо-Прилуцким монастырем, можно будет осуществить по мере освобождения имеющихся и строительства новых зданий в г. Вологде и Кириллове. Возможно также и строительство здания на территории Кирилло-Белозерского монастыря взамен имеющегося здания духовного училища, которое в настоящее время занято экспозицией музея. Однако на ближайшем этапе развития Спасо-Прилуцкого монастыря наиболее важными представляются работы по зонированию его территории. Благоприятным для осуществления зонирования фактором является то, что хозяйственная зона с мастерскими вынесена за периметр древней ограды и, таким образом, находится вне исторической части территории монастыря.

Для обслуживания экскурсионных групп на свободном участке возле стоянки экскурсионных автобусов целесообразно возвести новое здание со следующим набором помещений:

- 1) помещение для сбора экскурсантов,
- 2) буфет с подсобными помещениями,
- 3) комната экскурсоводов,
- 4) санузлы для посетителей и сотрудников.

Принимая во внимание дефицит площади монастыря, следует признать весьма актуальным предлагаемое выведение социально-бытовых и просветительских функций, осуществляемых зоной паломников и туристов, за пределы монастырской ограды. Выполненный визуально-ландшафтный анализ показал, что здание на этом участке не закрывает панораму архитектурного комплекса.

Отметим, что начало созданию зоны паломников в Спасо-Прилуцком монастыре положено еще в 1893 г., когда двухэтажное здание зимних настоятельских келий было превращено в паломническую гостиницу – странноприимный дом, работающий и в наши дни. Входы в церковный комплекс расположены на северо-западном участке территории монастыря, что естественным образом выделяет зону обслуживания паломников и туристов. Целесообразно отгородить эту территорию невысокой оградой по образцу внутренней ограды Кирилло-Белозерского монастыря [5] для ограничения доступа паломников и

туристов на территорию братии. Формируя многодворную планировочную систему, эти ограды позволят выделить парадный двор монастыря. Памятники некрополя, т.е. могила К. Н. Батюшкова и церковь св. Екатерины (семейная усыпальница дворян Волоцких), просматриваются с верхнего яруса стены монастырской ограды. Поэтому предлагается включить в экскурсионный маршрут галерею второго яруса стены ограды между бывшим караульным помещением Водяной башни и Южной башней. Это позволит осматривать все достопримечательности в комфортных условиях и исключит пересечения экскурсионного маршрута с путями движения монахов и слушателей к местам их церковной службы и учебы.

Ограничение доступа посетителей приведёт и к существенному увеличению зоны монастырской братии, восстановив в соответствии с принципом сохранения и использования природного ландшафта традиционные ландшафтные элементы – пруд и огород. Вопрос о посещении церкви Успения, интересной туристам и древнейшей из сохранившихся деревянных шатровых церквей, может быть решён путем её переноса на участок зоны обслуживания паломников и туристов. Планируется восстановить служение в этой церкви. Подход к превращению этого экспоната деревянного зодчества, привезенного в Спасо-Прилуцкий монастырь из Николо-Куштского монастыря, обсуждается в работе [5].

Церкви, доступные лицам с ограниченными возможностями, предлагается устроить в подклетах церквей монастыря. В рассматриваемом варианте развития Спасо-Прилуцкого монастыря часть его территории (примерно две трети от общей площади) отводится монастырской братии в качестве жилой зоны. При этом в южном углу жилой зоны сохраняется огород. Даже при условии прекращения доступа паломников и туристов, зона монастырской братии остается функционально насыщенной. Кроме воскресной школы и духовного училища, здесь расположены традиционные монастырские помещения: настоятельские и братские кельи, трапезная, административные, складские и технические помещения, библиотека и иконописная мастерская. Для разгрузки зоны монастырской братии и создания помещений, необходимых при обустройстве новой монастырской функции – учебной, предлагается использовать Вологодскую и Белозерскую башни в качестве лекционных аудиторий.

Однако кроме лекционных аудиторий, духовному училищу требуется дополнительное жилье для учащихся. Из-за того, что помещений существующих зданий не хватает, в настоящее

время стал стихийно застраиваться и без того узкий дворик между братским корпусом и северной стеной ограды. Хорошо известно, что во всех монастырских комплексах, состоящих из каменных зданий, сохранялись и строившиеся в разные годы деревянные постройки, которые обычно располагались вдоль стен деревянной ограды. Следуя этой традиции, в настоящей работе предлагается возвести в Спасо-Прилуцком монастыре здание келейного корпуса. Работы по переносу и реставрации церкви Успения, а также приспособление церковных подклетов в качестве приделов позволят расширить сакральную зону монастыря, обеспечив ее доступность для лиц с ограниченными возможностями. Таким образом, выдвинутые в данной работе предложения по развитию Спасо-Прилуцкого монастыря (см. рис. 2), согласуются с предложенными принципами формирования архитектуры православных монастырских комплексов.

Кирилло-Белозерский монастырь. Как отмечалось выше, основная часть существующих зданий Кирилло-Белозерского монастыря не может быть передана монастырской общине из-за необходимости сохранения музейных ценностей. Действительно, экспозиция музея занимает все келейные корпуса, Архимандричий корпус, а также помещения духовного училища, Казенной палаты, монастырского архива и больничных палат.

Реализация принципа разделения монастырских территорий на функциональные зоны в случае Кирилло-Белозерского монастыря состоит, прежде всего, в выделении на территории монастыря музейно-туристической зоны. Эта зона представляет собой территорию, сохраняемую в собственности музея. В нее предлагается включить Большой Успенский монастырь со всеми его зданиями (за исключением церквей), в которых размещены экспозиция, фондохранилища и административные помещения музея. Для расширения музейно-туристической зоны предлагается освоить неиспользуемый участок перед Святыми воротами, находящийся между Косой башней и стеной острога. На эту территорию, которая хорошо просматривается с дороги, ведущей от входа в монастырь до Святых ворот, предлагается перенести деревянную церковь Ризоположения и мельницу с восточной части «Нового города». В дальнейшем число памятников деревянного зодчества на этом участке можно увеличить, поставив их по берегам речки Свяги и соединив берега реки мостиками. Заилившееся и заваленное мусором русло реки необходимо прочистить. Также необходимо выполнить восстановление березовой аллеи, ведущей от Вологодской башни

до Святых ворот по направлению главной композиционной оси монастырского комплекса [5]. На этой озелененной территории с речкой и предлагается организовать участок деревянного зодчества, используя природный ландшафт в полном соответствии с принципом сохранения, восстановления и использования природного ландшафта монастырских территорий.

Важно подчеркнуть, что зонирование территории, осуществляемое в соответствии с предлагаемой реорганизацией генерального плана Кирилло-Белозерского монастыря, учитывает экскурсионные маршруты, разработанные музеем-заповедником. Для того, чтобы не нарушать экскурсионный маршрут, предлагается включить в музейную зону большую часть Малого Ивановского монастыря. Таким образом, музейно-туристическая зона будет располагаться на компактном участке с сохранением маршрута, позволяющего подойти от входа в монастырь ко всем памятникам архитектуры.

Для организации монастырской общины вологодскому Епархиальному управлению передана территория Малого Ивановского монастыря, составляющая седьмую часть всей территории Кирилло-Белозерского монастыря. Однако на переданной общине территории Малого Ивановского монастыря находятся две церкви (церковь Иоанна Предтечи и церковь Сергия Радонежского), а также три не церковных сооружения: малая больничная палата, Котельная и Кузнечная башни. Все здания Ивановского монастыря не отапливаемые и не приспособлены для службы и жилья.

Кроме того, участок, переданный общине, является мемориальной зоной, постоянно посещаемой паломниками и туристами. Здесь расположены особо почитаемые паломниками сооружения – сени над крестом, отмечающим место первой кельи преподобных Кирилла и Ферапонта, и сени над часовней игумена Кирилла. На этой территории невозможно возвести ни одно из нужных монастырской общине зданий. Нельзя ограничить и доступ паломников к святыням. Таким образом, на предоставленной территории невозможно обеспечить полноценное проживание братии, т.е. уединенное, как того требует специфика монастырской жизни, и, в то же время, удобное в бытовом отношении.

В настоящей работе путем визуально-ландшафтного анализа был выявлен участок на территории «Нового города», более пригодный для проживания монастырской братии. Было обнаружено, что на восточном участке «Нового города» площадью 4.5 га расположены два деревянных сооружения: церковь Ризоположения и мельница, в то время как остальная часть этого

участка не используется. После переноса церкви и мельницы на планируемый участок деревянного зодчества предлагается использовать восточную часть «Нового города» в качестве зоны монастырской братии. Расположение этой зоны на восточном участке «Нового города» вполне удобно, т.к. он находится в стороне от экскурсионных маршрутов, но, при этом, вблизи главного

входа в монастырь. Предлагаемый участок отделен от остальной территории существующей стеной внутренней ограды (высотой более 3 м) и оградой Острога, которую предлагается восстановить. Он имеет проход к церквям Большого Успенского и Малого Ивановского монастырей без пересечений с экскурсионными маршрутами.

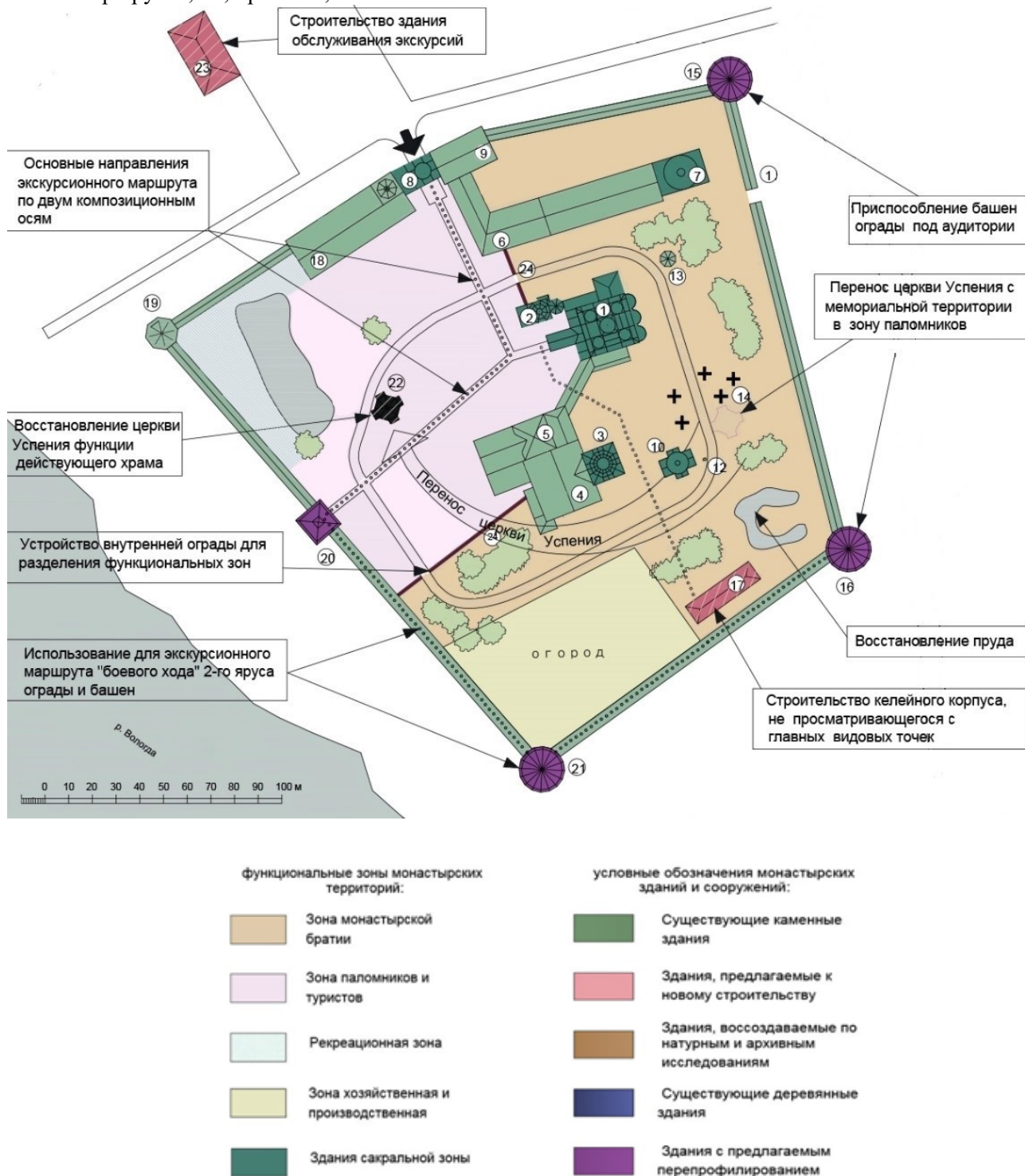


Рис. 2. Генеральный план и предложения по реконструкции и развитию Спасо-Прилуцкого монастыря

Очевидно, что существующая ситуация с формированием архитектурно-планировочной среды зоны монастырской братии существенно

осложнена невозможностью использования имеющихся зданий, занятых музейной экспозицией. Единственным решением проблемы отсутствия

жилой, социально-бытовой и учебно-просветительской групп помещений, предназначенных для монастырской братии, является строительство новых зданий. Для организации зоны монастырской братии на территории бывшего острога предлагается построить два братских корпуса с трапезной, а также настоятельский корпус.

Для разгрузки функционально перенасыщенного Спасо-Прилуцкого монастыря предлагается возратить Кирилло-Белозерскому монастырю находившееся в нём духовное училище, перенесенное позднее в Спасо-Прилуцкий монастырь. Для духовного училища предлагается зарезервировать участок вдоль северо-восточной стены монастырской ограды.

Жилые корпуса, расположенные на предлагаемом для них месте, находятся на значительном расстоянии от дороги, ведущей к музею от входа в монастырь через ворота Казанской башни. Корпуса прикрыты от Казанской башни восстанавливаемой стеной острога и не просматриваются ни из монастыря, ни с дальних видовых точек. С одной стороны, это вполне соответствует требованию уединенности жилья монахов, а с другой – отвечает принципу сохранения объемно-пространственной композиции архитектурного комплекса. В качестве дополнительных построек, необходимых для жизнедеятельности насельников монастыря, возможно использование уже переданных Кирилло-Белозерскому монастырю памятников архитектуры Иоанновского монастыря: Малой больничной палаты и Котельной башни.

Зону паломников и туристов предлагается разместить в северном углу «Нового города», на участке, который в настоящее время используется для проведения фольклорных праздников. Для реализации новой функции Кирилло-Белозерского монастыря, т.е. обслуживания паломников и туристов, предлагается строительство на монастырской территории нового здания странноприимного корпуса с трапезной для паломников. Здания зон монастырской братии и паломников, предлагаемые к возведению на территории «Нового города» на местах традиционной периметральной застройки, не перекрывают обзор памятников архитектуры с видовых точек экскурсионного маршрута. Кроме того, они не ставят под угрозу порчи сохранившиеся постройки и фундаменты утраченных зданий, обнаруженные путем археологических изысканий. Возможность обустройства жилья для братии монастыря и паломников в специально построенных зданиях, а не в приспособленных под жилые помещения памятниках архитектуры, позволяет обеспечить всех проживающих в монастыре жильем, соот-

ветствующим современным требованиям комфорта и санитарии, а также требованиям доступности всех помещений для лиц с ограниченными возможностями. В северо-западном углу монастыря (в пределах существующей внутренней ограды) предлагается устройство небольшой хозяйственной зоны. Эта территория имеет въездные ворота возле Белозерской башни.

Экспозиция музея-заповедника занимает не только исторические келейные, учебные и административные здания, но и церкви Кирилло-Белозерского монастыря. Если невозможность передачи, действующей общине зданий с другими функциями принимается как необходимое условие развития монастыря, то в отношении саковых объектов такой подход представляется неприемлемым: помещения церквей следует возратить монастырской общине. Для освобождения церквей от музейной экспозиции предлагается разместить ее в башнях монастырской ограды, разделив их внутренние объемы на ярусы при сохранении фасадов, по примеру приспособления башни Спасо-Прилуцкого монастыря [5]. Это предложение позволяет создать равнодоступную музейную экспозицию большой площади, а также использовать для осмотра комплекса более половины галерей стен ограды.

Предлагаемая в данной работе концепция развития Кирилло-Белозерского монастыря подразумевает вывод за пределы его территории тех функций, которые несовместимы с укладом монастырской жизни. Для реализации этих функций предлагается использовать свободный участок за северной стеной ограды. Создание рекреационной зоны на этой территории завершит зонирование Кирилло-Белозерского монастыря. Предложения по развитию Кирилло-Белозерского монастыря показаны на его генеральном плане (рис. 3).

Выводы. В настоящей работе предложены и обоснованы рекомендации по реконструкции ряда монастырей Русского Севера: Валдайского Иверского, Спасо-Прилуцкого, и Кирилло-Белозерского с учетом резкого увеличения числа паломников и туристов, посещающих эти монастыри. Эти рекомендации, разработанные на основе четырех основных принципов реконструкции и развития православных монастырей севера России [5], относятся как к генеральным планам монастырских комплексов в целом, так и отдельным зданиям главных функциональных групп. Предложенные рекомендации можно разделить на две группы: общие и частные. К общим рекомендациям для всех трех монастырей относится разделение архитектурными методами территории монастыря на функциональные зоны при со-

хранении архитектурных композиций монастырских комплексов и ландшафта окружающих территорий.

Частные рекомендации для Валдайского Иверского монастыря предполагают изменение приспособления ряда его зданий. Рекомендуется приспособить конюшенный корпус под паломническую гостиницу, а банный корпус – в качестве гаража. Кроме того, предлагается перенести вход

Никоновской башни с ее восточного фасада на западный – на сторону зоны обслуживания паломников и туристов. Целесообразно использовать северные и южные хозяйственные ворота только для нужд самого монастыря. Следует также создать внутренние ограждения, которые позволят выделить территорию, предназначенную только для монахов и послушников.



функциональные зоны монастырских территорий:	условные обозначения монастырских зданий и сооружений:
Зона монастырской братии	Существующие каменные здания
Зона паломников и туристов	Здания, предлагаемые к новому строительству
Рекреационная зона	Здания, воссоздаваемые по натурным и архивным исследованиям
Зона хозяйственная и производственная	Существующие деревянные здания
Территория КБИАХМЗ	Здания с предлагаемым перепрофилированием
Здания сакральной зоны	

Рис. 3. Генеральный план и предложения по реконструкции и развитию Кирилло-Белозерского монастыря

Рекомендации по реконструкции Спасо-Прилуцкого монастыря включают строительство нового здания на участке возле стоянки экскурсионных автобусов, предназначенного для обслуживания туристических групп, а также огородить зону обслуживания паломников и туристов невысокой оградой. В эту зону предлагается перенести деревянную церковь Успения, которая вызывает большой интерес у туристов. В подклетах монастырских церквей рекомендуется устроить церкви, доступные для лиц с ограниченными возможностями. Для того, чтобы разгрузить зону монастырской братии, предлагается использовать Вологодскую и Белозерскую башни как лекционные аудитории. Предлагается также возвести в Спасо-Прилуцком монастыре здание келейного корпуса.

Рекомендации по реконструкции Кирилло-Белозерского монастыря предполагают расширение музейно-туристической зоны путем освоения неиспользуемого в настоящее время участка перед Святыми воротами. Предлагается перенести на эту территорию деревянную церковь Ризоположения и мельницу из восточной части «Нового города», для того чтобы, используя природный ландшафт, организовать там участок деревянного зодчества. После переноса церкви и мельницы восточную часть «Нового города» следует использовать в качестве зоны монахов и насельников. Для обустройства этой зоны рекомендуется построить два братских корпуса с трапезной и настоятельский корпус. Предлагается также обустроить небольшую хозяйственную зону в северо-западном углу монастырской территории. Наконец, предлагается использовать Малую больничную палату и Котельную башню переданные Кирилло-Белозерскому монастырю, в качестве дополнительных зданий, которые необходимы насельникам. Зону паломников и туристов предполагается разместить в северном углу «Нового города», где предлагается построить новое здание странноприимного корпуса с трапезной для паломников. Проводимые на этой территории фольклорные праздники следует организовывать на свободном участке за северной стеной ограды монастыря. Кроме того, предлагается возвратить Кирилло-Белозерскому монастырю находившееся в нем ранее духовное училище, что поможет разгрузить Спасо-Прилуцкий монастырь, осуществляющий сейчас слишком большое число разнородных функций. Для размещения училища следует использовать участок территории вдоль северо-восточной стены монастырской ограды.

Показано, что для всех трех рассматриваемых в работе монастырей применение этих реко-

мендаций приведет к созданию многофункциональной архитектурно-пространственной среды и обеспечит наилучшие возможные условия как для насельников, так и для посетителей монастырей. Предложенный в настоящей работе подход планируется применить и к ряду других монастырей Русского Севера: Ферапонтову, Антонию-Сийскому, и Свято-Троицкому Зеленецкому.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко Д.В. Аспекты правового регулирования паломничества и религиозного туризма на современном этапе // Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса. 2015. №3. С. 14–20.
2. Косолапов А.Б. География российского внутреннего туризма: учебное пособие, Москва: КНОРУС. 2017, 268 с.
3. Spock. J.B. Northern Russian Monastic Culture // The tapestry of Russian Christianity. Studies in History and Culture, Department of Slavic and East European Languages and Cultures, Ohio State University, Columbus, Ohio, 2016. 435 p.
4. Ильвицкая С.В., Швецова-Шиловская Е.А. Спасение от паломников // Журнал Московской Патриархии. Храмоздатель: Приложение о церковном строительстве. 2013. № 2 (3). С. 48–56.
5. Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В. Принципы реконструкции и развития православных монастырей русского севера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 49–59.
6. Бусева-Давыдова И.Л. Русские православные монастыри до 1917 года // Монастыри: Энциклопедический справочник, Москва: Республика. 2000, 464 с.
7. Brumfield W.C. A History of Russian Architecture, University of Washington Press, Seattle, 2003. 744 p.
8. Brumfield W.C., Hensley H. Architecture at the end of the Earth: Photographing the Russian North, Duke University Press, Durham and London, 2015. 256 p.
9. Brumfield W.C. Lost Russia: Photographing the Ruins of Russian Architecture, Duke University Press, Durham and London, 1995. 130 p.
10. Metropolitan Alfeyev. H. Orthodox Christianity. Volume III: The Architecture, Icons, and Music of the Orthodox Church, St. Vladimir's Seminary Press Yonkers, New York, 2014. 369 p.
11. Штриккер Г. Русская Православная Церковь в советское время (1917-1991), Москва: Прополи. 1995, 400 с.
12. Белоярская И.К. Монастырские комплексы Вологодской области. Принципы современной реабилитации: дисс...канд. архитектуры. С.-Пб., 2002. 257 с.

13. Белоярская И.К. Архитектурное наследие Вологодской области в контексте современной культуры // Русская культура нового столетия: Проблемы изучения, сохранения и использования историко-культурного наследия, Вологда: Книжное наследие, 2007. 838 с.

14. Белоярская И.К. Архитектурный ансамбль Спасо-Суморина монастыря // Преобразование в веках: исследования и материалы по истории Спасо-Суморина монастыря, Вологда: Книжное наследие, 2007. 199 с.

15. Ильвицкая С.В. Закономерности формирования архитектуры православных монастырских комплексов: на примере балканских стран: дисс. докт. архитектуры. М., 2005. 696 с.

16. Ильвицкая С.В. Архитектура православных монастырей: традиции и современность, Кашин: Лабиринт (М.), 2007. 256 с.

17. Ильвицкая С.В. Архитектурно-компаративный аспект православных монастырей балканских стран и России, М.: Инфра-М. 2018, 99 с.

18. Федотова Л. А. Архитектурная организация исторических комплексов паломнического туризма: дисс...канд. архитектуры. М., 2013. С 22–63.

19. Федотова Л.А. Религиозный туризм как путь возрождения историко-культурного наследия (на примере Коломенского района) // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №9. С. 29–31.

20. Родионовская И.С., Федотова Л.А. Современная архитектура жилой среды религиозно-паломнического туризма // Жилищное строительство. 2013. № 1. С. 23–26.

21. Сойкин П.П. Иверский Валдайский монастырь в Валдайском уезде // Православные русские обители: Полное иллюстрированное описание православных русских монастырей в Российской Империи и на Афоне, Санкт-Петербург: Воскресение. 1994, 712 с.

22. Истомина Э.Г., Красноречьев Л.Е. Иверское чудо. Л.: Лениздат. 1982, 48 с.

23. Спасо-Прилуцкий Димитриев Монастырь в Вологде, ООО Издательский дом Вологжанин: Вологда. 2007, 25 с.

24. Спасо-Прилуцкий Димитриев Монастырь [Электронный ресурс]. Системные требования: Google Chrome. URL: www.spas-priluki.ru (дата обращения: 15.03.2021).

25. Кочетков И.А., Лелекова О.В., Подъяпольский С.С. Кирилло-Белозерский монастырь, Л.: Художник РСФСР, 1979. 184 с.

Информация об авторах

Швецова-Шиловская Елизавета Александровна, аспирантка кафедры архитектуры. E-mail: LizaSh-Sh@list.ru. Государственный университет по землеустройству. Россия, 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 15.

Ильвицкая Светлана Валерьевна. Доктор архитектуры, профессор, заведующая кафедрой архитектуры. E-mail: ilvitskaya@mail.ru. Государственный университет по землеустройству. Россия, 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 15.

Поступила 19.03.2021 г.

© Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В., 2021

***Shvetsova-Shilovskaya E.A., Ilvitskaya S.V.**

State University of Land Use Planning

**E-mail: LizaSh-Sh@list.ru*

RECONSTRUCTION OF THE VALDAI IVERSKY, SPASO-PRILUTSKY AND KIRILLO-BELOZERSKY MONASTERIES IN MODERN CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF PILGRIMAGE AND TOURISM

Abstract. The development of Orthodox monasteries in the north of Russia is facing difficulties due to the increase in the number of pilgrims and tourists, as well as the restoration of traditional and the emergence of new functions performed by monastic complexes. The four basic principles of reconstruction and development of Orthodox monastery complexes of the Russian North formulated earlier allow to develop specific recommendations aimed at reconstruction and development of monasteries. In this work, recommendations are developed for the Iver Monastery, Spaso-Prilutskiy Monastery and Kirillo-Belozerskiy Monastery that substantially differ in their preservation and performed functions. The developed recommendations are concerned with the general plans of the monastery complexes, as well as the buildings comprising the main functional groups of these monasteries. In all the monasteries considered in this paper, the application of these recommendations will lead to the formation of an accessible multifunctional architectural and spatial environment. Such environment provides optimal zoning of the monastery territory, preserves both architectural ensemble

of a given monastery complex and the surrounding nature landscape and creates the best possible conditions for the monastery inhabitants and visitors. The approach proposed in this paper is planned to be developed and applied to a number of other monasteries in the Russian North.

Keywords: *Orthodox monasteries, Russian North, pilgrims and tourists, reconstruction and development, general plan, architectural and spatial composition.*

REFERENCES

1. Bondarenko D.V. Regulatory aspects of pilgrimage and religious tourism at the present stage. [Aspekty pravovogo regulirovaniya palomnichestva i religioznogo turizma na sovremennom etape], Vestnik associacii vuzov turizma i servisa. 2015. No. 3. Pp. 14–20 (rus)
2. Kosolapov A.B. Geography of Russian internal tourism: text-book. [Geografiya rossijskogo vnutrennego turizma: uchebnoe posobie]. Moscow: KNORUS, 2017. 268 p. (rus)
3. Spock. J.B. Northern Russian Monastic Culture. The tapestry of Russian Christianity. Studies in History and Culture, Department of Slavic and East European Languages and Cultures, Ohio State University, Columbus, Ohio, 2016. 435 p.
4. Ilvitskaya S.V., Shvetsova-Shilovskaya E.A. Salvation from pilgrims. [Spasenie ot palomnikov]. Journal of the Moscow Patriarchate. Temple Maker: Church Building Appendix. 2013. No. 2 (3) Pp. 48–56. (rus)
5. Shvetsova-Shilovskaya E.A., Ilvitskaya S.V. Principles of reconstruction and development of orthodox monasteries in Russian North [Principy rekonstrukcii i razvitiya pravoslavnyh monastyrej Russkogo Severa], Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 2. Pp. 49–59. (rus)
6. Buseva-Davydova I.L. Russian orthodox monasteries before 1917 in Monasteries: The encyclopedic reference book [Russkie pravoslavnye monastyri do 1917 goda v Monastyri: Enciklopedicheskij spravocnik]. Moscow: Republic, 2000. 464 p. (rus)
7. Brumfield W.C. A History of Russian Architecture. University of Washington Press. Seattle, 2003. 744 p.
8. Brumfield W.C., Hensley H. Architecture at the end of the Earth: Photographing the Russian North, Duke University Press, Durham and London, 2015. 256 p.
9. Brumfield W.C. Lost Russia: Photographing the Ruins of Russian Architecture. Duke University Press. Durham and London, 1995. 130 p.
10. Metropolitan Alfeyev. H. Orthodox Christianity. Volume III: The Architecture, Icons, and Music of the Orthodox Church. St. Vladimir's Seminary Press Yonkers. New York, 2014. 369 p.
11. Shtrikker G. Russian Orthodox Church in the Soviet Period (1917-1991). [Russkaya Pravoslavnaya Cerkov' v sovetskoe vremya (1917-1991)]. Moscow: Propilei, 1995. 400 p. (rus)
12. Beloyarskaya I.K. Monastery complexes of the Vologda region. Principles of modern rehabilitation [Monastyrskie komplekсы Vologodskoj oblasti. Principy sovremennoj reabilitacii: diss...kand. arhitektury]. Saint-Petersburg, 2002. 257 p. (rus)
13. Beloyarskaya I.K. Architectural heritage of the Vologda region in the context of modern culture in Russian culture of the new century: Problems of study, conservation and use of historical and cultural heritage [Arhitekturnoe nasledie Vologodskoj oblasti v kontekste sovremennoj kul'tury v Russkaja kul'tura novogo stoletija: Problemy izuchenija, sohraneniya i ispol'zovaniya istoriko-kul'turnogo nasledija]. Vologda: Knizhnoe nasledie, 2007. 838 p. (rus)
14. Beloyarskaya I.K. Architectural ensemble of the Spaso-Sumorin monastery. Transformation in the centuries: The studies and materials on history of the Spaso-Sumorin monastery [Arhitekturnyj ansambl' Spaso-Sumorina monastyrya v Preobrazhenie v vekah: issledovaniya i materialy po istorii Spaso-Sumorina monastyrya]. Vologda: Book heritage, 2007. 199 p. (rus)
15. Ilvitskaya S.V. Patterns in formation of architecture of Orthodox monastic complexes: On the example of Balkan countries [Zakonomernosti formirovaniya arhitektury pravoslavnyh monastyrskih kompleksov: na primere balkanskih stran: diss... dokt. arhitektury]. Moscow, 2005. 696 p. (rus)
16. Ilvitskaya S.V. Architecture of Orthodox monasteries: tradition and modernity [Arhitektura pravoslavnyh monastyrej: tradicii i sovremennost']. Kishinev: Labitint (Moscow), 2007. 256 p. (rus)
17. Ilvitskaya S.V. The Architectural comparative aspect of orthodox monasteries in the Balkan countries and Russia [Arhitekturno-komparativnyj aspekt pravoslavnyh monastyrej balkanskih stran i Rossii]. Moscow: Infra-M, 2018. 99 p. (rus)
18. Fedotova L. A. Architectural organization of historical complexes for pilgrim tourism. [Arhitekturnaya organizaciya istoricheskikh kompleksov palomnicheskogo turizma: diss...kand. arhitektury]. Moscow, 2013. 211 p. (rus)
19. Fedotova L.A. Religious tourism as a way to restore historical and cultural heritage (on the example of the Kolomensky region) [Religioznyj turizm kak put' vrozozhdeniya istoriko-kul'turnogo nasledija (na primere Kolomenskogo rajona)]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2012. No. 9. Pp. 29–31. (rus)
20. Rodionovskaya I.S., Fedotova L.A. Modern architecture of the living environment of religious

and pilgrim tourism [Sovremennaja arhitektura zhi-loj sredy religiozno-palommicheskogo turizma]. Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2013. No. 1. Pp. 23–26. (rus)

21. Soikin P.P. Iversky Valdaisky monastery in Valdaisky county in Orthodox Russian monastery abodes: Complete illustrated description of Russian Orthodox monasteries in the Russian Empire and Mount Athos [Iverskij Valdajskij monastyr' v Valdajskom uezde v Pravoslavnye russkie obiteli: Polnoe illyustrirovannoe opisanie pravoslavnyh russkih monastyrej v Rossijskoj Imperii i na Afone] Saint-Petersburg: Resurrection, 1994. 712 p. (rus)

22. Istomina E.G., Krasnorech'ev L.E. Iversky miracle [Iverskoe chudo]. Leningrad: Lenizdat, 1982. 48 p. (rus)

23. Spaso-Prilutsky Dimitry Monastery in Vologda. [Spaso-Priluckij Dimitriev Monastyr' v Vologde]. Vologda: OOO Izdatel'skij dom Vologzhanin, 2007. 25 p. (rus)

24. Spaso-Prilutsky Dimitri Monastery [Spaso-Priluckij Dimitriev Monastyr'] Google Chrome. URL: www.spas-priluki.ru (date of treatment: 15.03.2021)

25. Kochetkov I.A., Lelekova O.V., Pod'yapol'skiy S.S. Kirillo-Belozersky Monastery. [Kirillo-Belozerskij monastyr']. Leningrad: Hudozhnik RSFSR, 1979. 184 p. (rus)

Information about the authors

Shvetsova-Shilovskaya, Elizaveta A. Postgraduate student. E-mail: LizaSh-Sh@list.ru. State University of Land Use Planning. Russia, 105064, Moscow, st. Kazakova, 15.

Ilvitskaya, Svetlana V. DSc, Professor. E-mail: ilvitskaya@mail.ru. State University of Land Use Planning. Russia, 105064, Moscow, st. Kazakova, 15.

Received 19.03.2021

Для цитирования:

Швецова-Шиловская Е.А., Ильвицкая С.В. Реконструкция Валдайского Иверского, Спасо-Прилуцкого и Кирилло-Белозерского монастырей в современных условиях развития паломничества и туризма // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 36–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-36-49

For citation:

Shvetsova-Shilovskaya E.A. Ilvitskaya S.V. Reconstruction of the Valdai Iversky, Spaso-Prilutsky and Kirillo-Belozersky monasteries in modern conditions for the development of pilgrimage and tourism. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 36–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-36-49

Петухова Н.М.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: tama8nina@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО АНСАМБЛЯ ПРИВОКЗАЛЬНОЙ ЗНАМЕНСКОЙ ПЛОЩАДИ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Аннотация. Рассмотрена история формирования привокзальной Знаменской площади (ныне площадь Восстания) в Санкт-Петербурге. Площадь возникла перед вокзалом первой магистральной железной дороги в России, соединившей две столицы – старую и новую – Москву и Петербург (с 1855 г. – Николаевская, с 1923 – Октябрьская железная дорога). Государственный статус дороги определил и статус привокзальной площади перед ее главным вокзалом в Санкт-Петербурге. Площадь создавалась как один из основных градостроительных ансамблей города, формированию которого уделялось внимание на самом высшем уровне.

Изучены обширные архивные источники, выписки и графические материалы из которых представлены в данной статье. На основании проведенного историко-градостроительного анализа выявлены основные факторы, повлиявшие на выбор места размещения вокзала Санкт-Петербургско-Московской железной дороги и ее привокзальной площади в Санкт-Петербурге.

Показано, что Знаменская площадь является одним из последних градостроительных ансамблей Санкт-Петербурга, создававшихся централизованно на основе классических принципов по единому проекту, включающему весь фронт формирующих ее зданий.

Установлено, что Знаменская площадь является уникальным градостроительным явлением, поскольку в истории архитектуры XIX века больше не известен факт создания привокзальной площади, задуманной как единый регулярный ансамбль.

Ключевые слова: Знаменская площадь, привокзальная площадь, градостроительный ансамбль, Александровская площадь в Санкт-Петербурге, регулярная площадь, архитектор Н.Е. Ефимов.

Введение. Строительство железных дорог к середине XIX века вызвало появление не только нового типа здания – пассажирского дома (вокзала¹), но и формирование нового типа градостроительного пространства – привокзальной площади. Площадь, прилегающая к зданию вокзала, являлась неким буферным пространством, осуществляющим взаимосвязь между городом и внешними территориями. При этом транспортная функция железной дороги транслировалась в пространство площади, обуславливая ее использование как некоего пересадочного узла от внешней транспортной системы – железнодорожной к внутригородской. В свою очередь, формирование привокзальных площадей зависело от градостроительной ситуации, обуславливая не только их расположение, габариты и пр., но и тип застройки [1]. Первые вокзалы железных дорог стремились расположить возможно ближе к центру города, но это движение в большинстве случаев было остановлено у его исторических границ плотной городской застройкой.

Сразу после своего появления привокзальные площади становятся точками концентрации

городской жизни, местом активного строительства и размещения различных общественных заведений – гостиниц, ресторанов и пр. «С середины XIX века именно железнодорожное строительство превращается в России в первостепенный по значению градоформирующий фактор» [2, с. 31].

При этом зачастую этот процесс происходит достаточно стихийно, без единого плана, учитывая только функциональное назначение без внимания к единству архитектурно-художественного решения площади. Камилло Зитте, еще в 1889 г. отмечал, что «можно отметить признание технических достижений в области транспорта, удачного использования застраиваемой территории и особенно в области улучшения гигиены. – добавляя, – ... в техническом отношении достигнуто много, а в художественном – почти ничего». В связи с этим он исследовал старые площади, «чтобы выяснить причины производимого ими прекрасного впечатления. На основе правильного выявления этих причин можно определить совокупность правил, соблюдение которых и сегодня может дать благоприятные результаты» [3, с. 8].

¹ В тексте далее мы будем пользоваться этим принятым в настоящее время в нашей стране термином «вокзал», хотя в описываемый период употреблялся термин «пассажирский дом». Термин вокзал («воксал») взял свое начало от

«Voksholl» по названию увеселительного парка с павильоном под Лондоном, и именно в этом смысле употреблялся для конечной станции первой в России Царскосельской железной дороги в Павловске, что и послужило в дальнейшем поводом для абстракции понятия.

Эта цель по-прежнему актуальна, особенно в отношении привокзальных площадей, градостроительное значение и принципы включения которых в городской контекст изменяются вслед за качественным изменением железнодорожного транспорта, развитием высокоскоростных магистралей, перепрофилированием зданий вокзалов и т.п. [4].

Степень изученности проблемы носит, по преимуществу, общий характер – в той или иной мере роли строительства железных дорог и их вокзалов уделялось внимание в большинстве публикаций исследователей, занимающихся проблемами градостроительства и стилиевой эволюции того периода: Е.А. Борисовой, А.В. Иконниковым, Е.И. Кириченко, В.Г. Лисовским, М.В. Нащокиной, А.Л. Пуниным и др. Описание архитектуры Николаевского вокзала дается в публикациях Т.А. Славиной, посвященных творчеству К.А. Тона. В книгах, связанных непосредственно Санкт-Петербургско-Московской железной дорогой, освещаются, в большей мере, вопросы её истории и эксплуатации, а не архитектурные особенности. Общим вопросам формирования привокзальных площадей уделяется внимание в книге В.М. Батырева «Вокзалы» [1]. Вместе с тем, история формирования привокзальной Знаменской площади и ее архитектурного ансамбля остались вне сферы внимания исследователей.

Объектом настоящего исследования является одна из первых привокзальных площадей в России, появившаяся перед вокзалом Санкт-Петербургско-Московской (с 1855 г. Николаевской, с 1923 – Октябрьской) железной дороги на Знаменской площади в Санкт-Петербурге (ныне Площадь Восстания). Выбор Знаменской площади в качестве объекта исследования не случаен – это единственный пример привокзальной площади середины XIX века, задуманной как единый градостроительный ансамбль. По мнению А.Л. Пунина «Идея ансамбля Знаменской площади стала одним из последних проявлений градостроительного мышления, сформированного эстетикой классицизма» [5].

Важное градостроительное и архитектурно-художественное значение ансамбля привокзальной Знаменской площади определили *цель исследования*, заключающуюся в выявлении основных закономерностей и принципов процесса ее формирования.

Поставленная цель обусловила *задачи исследования*, в число которых входят, помимо изучения истории формирования привокзальной Знаменской площади и создания ее архитектурного ансамбля, исследование типологии привокзальных площадей, общих принципов их размещения в структуре города и взаимодействия с ним.

Материалы и методы. Статья в большой мере построена на материалах архивных источников из фондов Российского государственного исторического архива (РГИА) с использованием текстовых выдержек и графических материалов, включая проектные чертежи, картографические материалы, акварели, рисунки, литографии, фотографии и открытки второй половины XIX – нач. XX вв. (некоторые из них публикуются впервые).

В качестве метода исследования автором применен системный анализ на основе изучения и обобщения иконографических и картографических материалов, архивных и литературных источников.

Методологической основой исследования послужило рассмотрение вокзала и привокзальной площади как элемента градостроительной системы «вокзал-город», развитие которой происходит на основе двухвекторного взаимодействия – «от города к вокзалу» и «от вокзала к городу».

Типы привокзальных площадей и основные принципы их расположения в структуре города. Типология площадей тесно связана как с типологией вокзала, так и с градостроительным контекстом. По своему планировочному решению и расположению относительно железнодорожных путей вокзалы делятся на три основных типа: тупиковые, когда здание вокзала расположено в конце путей, с боковым расположением корпусов и островные. Для конечных станций, расположенных в крупных городах, наиболее распространенным является тупиковый тип вокзала. Вокзалы с боковым расположением относительно путей встречаются на крупных станциях значительно реже, островной тип вокзала встречается, как правило, на проходных станциях. Планировочный тип вокзала оказывает непосредственное влияние на формирование их привокзальных площадей, расположение которых зависит от размещения корпусов прибытия и отбытия с входами в вокзал и выходами из него, кассовых залов, залов ожидания и пр. [6]

Однако, привокзальная площадь, принадлежащая в большей мере пространству города, чем пространству железной дороги, зависит от градостроительной ситуации не менее, а зачастую и более, чем от типологии и планировочной структуры вокзала. Формирование привокзальной площади определяется наличием свободного городского пространства и возможностью отчуждения земель для ее размещения в том или ином месте, а также расположением основных городских магистралей.

Первые вокзалы стремились расположить возможно ближе к центру города, но это движение в большинстве случаев было остановлено у его исторических границ плотной городской застройкой. Поиски значительных площадей для размещения железнодорожных вокзалов с их инфраструктурой в ограниченной орбите старой городской границы шли в разных направлениях, в зависимости от особенностей городской застройки. Так в Париже для этих целей конфисковывались земли монастырей и огороды, окружающие столицу, чему способствовал закон 1841 года, наделивший префекта властью экспроприровать любое здание «на благо общественного строительства и ради оздоровления города» [7, с.440]. Расположение вокзалов в пространстве между пересечением основных магистралей, ведущих к центру города, обеспечивало наиболее короткую связь с городом, но осложняло их дальнейшее развитие, обуславливая устройство узких и неудобных привокзальных площадей в большинстве западноевропейских столиц (Париж, Лондон, Мадрид и др.) [8, 9].

В России размещение первых вокзалов и развитие их площадей облегчалось наличием свободных незастроенных пространств у исторических границ города. Вокзал первой магистральной Санкт-Петербургско-Московской железной дороги в Москве, после безуспешных поисков места в центре города, был размещен на обширной малоосвоенной территории Каланчевского поля, где впоследствии в 1961 г. появились еще два вокзала (Рязанский (Казанский) и Ярославский), сформировав знаменитую «площадь трех вокзалов» (Комсомольская площадь) [10].

В Санкт-Петербурге для этой цели были использованы территории плацев военных гарнизонов, расположенных вдоль границ города [11]. Царскосельский вокзал (1837 г.) занял часть Семеновского плаца, Николаевский (1851) – часть Александровского. Варшавский (1851) и Петергофский (Балтийский) (1853-1857) вокзалы были расположены на свободных территориях на левом берегу Обводного канала.

Все эти вокзалы были построены по схожей планировочной схеме тупикового вокзала, но особенности их размещения и включения в градостроительный каркас города определили различное положение их привокзальных площадей относительно здания вокзала и различную степень их градостроительной значимости.

Можно выделить два основных типа расположения привокзальных площадей относительно здания вокзала: вдоль боковых корпусов и перед лицевым фасадом [6]. Примеры бокового расположения привокзальных площадей нам дают первый Царскосельский и Варшавский вокзалы в

Санкт-Петербурге, расположенные практически по красным линиям застройки Загородного проспекта и Обводного канала соответственно. Эти площади не играли сколько-нибудь значительной роли в общей градостроительной структуре, выполняя, по большей мере, функцию обслуживания вокзала, что является общим принципом для привокзальных площадей такого типа.

К привокзальным площадям с лицевым расположением относительно здания вокзала относятся площади перед Балтийским вокзалом, находящимся в непосредственной близости от Варшавского, и перед вокзалом Санкт-Петербургско-Московской (Николаевской) железной дороги. Эти площади образуют самостоятельные градостроительные пространства, включенные в общую городскую структуру и играющие в ней значительную роль. Особенностью Знаменской площади является то, что она функционально в той же мере принадлежит пространству города, что и пространству вокзала, располагаясь практически по оси Невского проспекта и выполняя, в том числе, функцию транзитного транспортного движения и транспортной развязки для втекающих в нее улиц.

Основная часть. Формирование Знаменской площади в Санкт-Петербурге. Сооружение первой российской магистральной железной дороги, соединившей две столицы – старую – Москву и новую – Санкт-Петербург, началось в августе 1842 года. Для ее главного вокзала в Санкт-Петербурге было выбрано место на Знаменской площади, замыкающей собой Невский проспект в месте его излома на продолжении к Александро-Невской Лавре. Площадь возникла перед церковью Знамения (Входа Господня в Иерусалим), давшей ей свое название [12, 13]. Церковь, построенная Ф. И. Демерцовым в 1794-1809 гг. взамен старой деревянной, располагалась на берегу Лиговского канала и закрепляла северо-западную границу площади, являясь композиционным и архитектурным акцентом не только площади, но и всего района (рис. 1). Ограда вокруг церкви и часовня были построены позже в 1860-х годах [14]. Знаменская площадь до появления там вокзала железной дороги, имела незначительные размеры и нерегулярный характер.

Вместе с тем, она имела очень важное градостроительное значение, представляя собой, по сути, транспортную развязку в месте схода трех основных магистралей: Невского проспекта, дороги к Александро-Невской лавре и далее к Шлиссельбургу и древнего Новгородского тракта, существовавшего еще до появления Санкт-Петербурга (рис. 2). Безусловно, ключевая

роль данной местности в градостроительно-планировочной структуре города явилась *первым и определяющим фактором* при выборе места для

размещения вокзала первой магистральной железной дороги в России.



Рис. 1. Церковь Знамения (Входа Господня в Иерусалим) на берегу Лиговского канала (ныне Лиговский проспект, церковь утрачена). Фото 1860-х гг. [12]



Рис. 2. План г. Петербурга. 1843 г.: А – Александровский плац – будущее место станции Санкт-Петербургско-Московской железной дороги; 3 – Знаменская площадь до появления железной дороги. Фрагмент карты со Знаменской площадью. [Санкт-Петербург. Планы и карты: альбом. – СПб.: ЗАО «Карта» ЛТД, 2004]

Вторым фактором, определившим расположение вокзала, послужило наличие свободных от застройки территорий – помимо Знаменской

площади, для нужд железной дороги была использована территория Александровской пло-

щади, принадлежащей военному ведомству и использовавшаяся как плац для учения войск (рис. 2). Согласно «Записке по делу Министерства путей сообщения», в которой подробно изложена история площади, «В конце 20-х годов прошлого столетия в той местности Петербурга, где ныне находится пассажирская станция Николаевской железной дороги, была устроена площадь для учения войск, получившая затем название Александровского плаца. (...)». В 1843 году по докладу главноуправляющего Путей сообщения и Публичных зданий Высочайше повелено было устроить в той местности пассажирскую станцию Николаевской железной дороги, образовать новый Александровский плац и провести новую улицу, сделав немедленно распоряжение к приобретению в казну узаконенным порядком чрез оценочную комиссию всех домов и земель под сии учреждения отойти имеющих» (...). Императору Николаю I на представленном ему 23 ноября 1843 года проекте военно-Александровского плаца «благоугодно было (...) собственноручно начертить линии образования сего плаца и новой улицы от угла его до Невского проспекта, и вместе с тем Высочайше повелеть, пассажирскую станцию устроить не там, где предполагалось, а по линии Невского проспекта» [15].

Александровский плац, после отчуждения в 1843 году под нужды железной дороги его части, служил для станции неким земельным резервом, позволяющим ей расширяться: в 1847 железной дороге было передано «городу принадлежащей земли, отошедшей от Александровского плаца и Старой военной улицы 46 683 $\frac{1}{4}$ кв. саж. ... Затем, 29 июня 1861 года последовало Высочайшее повеление об отчуждении частных земель и других имуществ под ту же станцию Николаевской железной дороги, потребовавшей значительного расширения». Упоминается также «указание об отводе из Александровского плаца участков земли в 1884 году под стоянку вагонов и в 1847 году под постройку казарм Лейб-Гвардии Казачьего полка...» [15].

Потеря Александровской площади в городской топонимике объясняется краткостью ее существования до ее поглощения железной дорогой. «Служа местом воинских учений, площадь эта в то же время служила и для общего пользования. Именным Высочайшим указом, данным 19 Апреля 1830 г. на имя Санкт-Петербургского военного Генерал-Губернатора, Александровский плац назначен был городской площадью. (...) Неуказание плаца на городском плане как площади, объясняется временем составления планов и образования площади: ген. Планы

Санкт-Петербурга утверждались в 1829 и 1880 годах, а площадь была устроена после 1830 г. и упразднена в 1863 г.» [15].

Однако территорий двух городских площадей для урегулирования привокзальной площади и размещения станции железной дороги оказалось недостаточно, и тут сыграл роль *третий фактор* – окраинное положение местности, обуславливающее меньшую, чем в центральных районах, стоимость земельных участков и расположенной там застройки, что позволяло отчуждать земли для нужд железной дороги с наименьшими затратами.

До постройки вокзала это была бедная окраинная территория, характер занятий населения которой отражался в названиях окружающих Знаменскую площадь улиц и переулков: Каретная, Гончарная, Стремянная, Свечной, Поварской и т.п. «Знаменская площадь обширна и пустынна... - писал известный в то время юрист А.Ф. Кони. - Двух и одноэтажные дома обрамляют ее, мимо протекает узенькая речка (Лиговский канал – ныне Лиговский проспект – прим. автора). Вода в ней мутна и грязна, а по берегу тянутся грубые деревянные перила. Это Лиговка» [цит. по: 12, с. 66].

Примыкающая к площади застройка вдоль восточного берега Лиговского канала, где впоследствии прошла железная дорога и была размещена станция, имела разреженный характер 1–2 этажными деревянными и каменными домами, расположенными на частновладельческих участках, в глубине которых располагались сады и огороды. На продолжении Невского проспекта и Гончарной улицы площадь ограничивалась частновладельческими участками, с застройкой 2-х – 4-х – этажными каменными домами, впоследствии выкупленными железной дорогой для расширения площади и придания ей регулярного характера в соответствии с резолюцией Императора: «Государь Император изволил утвердить место для Пассажирской станции, согласно предположению на приложенном плане сделанному, но с тем, чтобы под площадь взято было все место под № 1, 2, 3 и 4, как отчеркнуто Его Величества карандашом» [16].

Архитектор Желязевич докладывал в Справке от 7 Декабря 1844 г.: «Сломка домов под местность пассажирской станции начата была: а) купца Эзелева, подполковницы Спиридоновой и Графа Эссен-Стенбок-Фермора около 7-го апреля; б) Купцов: Трифанова, Пивоварова, купчихи Трубиной, Г. Рогова, Архитектора Воцкаго и купца Тимофеева, около 1 мая; и в) фабриканта Шрейбера 7 июня сего года» [15, л.181].

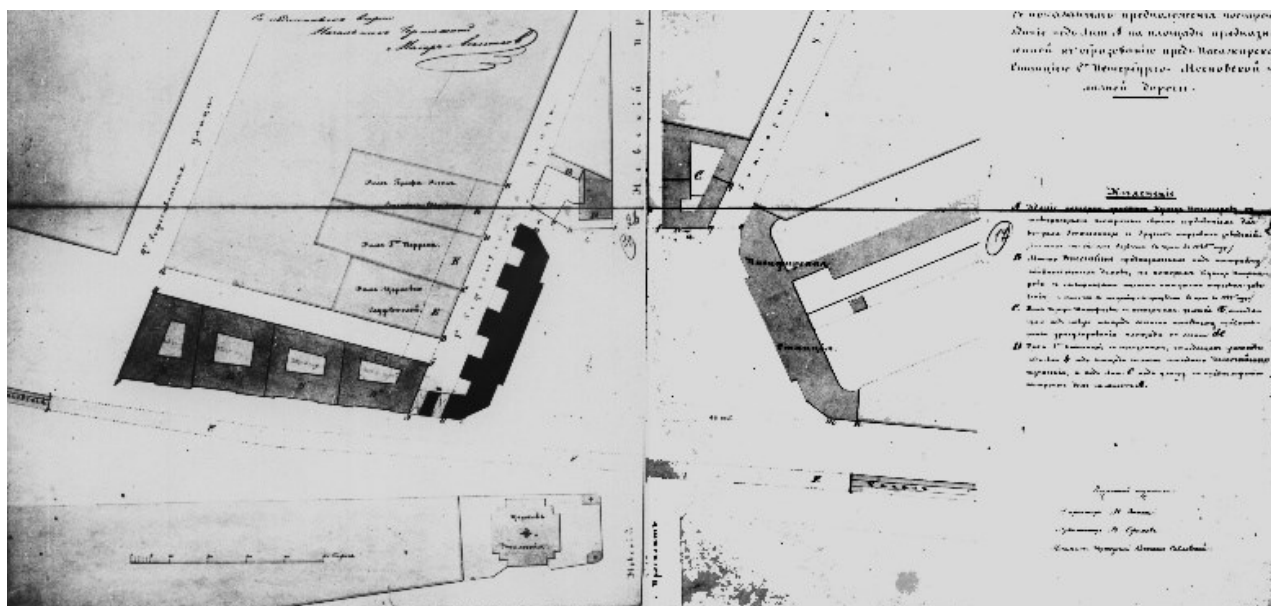


Рис. 3. Знаменская площадь перед вокзалом Санкт-Петербургско-Московской железной дороги в Санкт-Петербурге. Генплан. Арх. Н.Е. Ефимов, 1844 г. [16]

Появление вокзала железной дороги превращает Знаменскую площадь из «захолустной» в один из основных градостроительных ансамблей города, создававшихся по единому проекту и под личным контролем Императора Николая I. В августе 1844 года был утвержден проект планировки площади перед зданием вокзала, выполненный архитектором Н.Е. Ефимовым с учетом отчеркнутых «Его Величества карандашом» правок (рис. 3) [16]. Проект включал в себя не только пространственное урегулирование площади, но и фасады обрамляющих ее домов. Незадолго до этого архитектор вернулся из Италии, и явно под впечатлением от поездки, создает в северной столице градостроительный ансамбль в традициях итальянских площадей периода Ренессанса. Ренессансные традиции проявились как в планировке площади, так и в архитектуре формирующих ее облик зданий.

Площади была придана форма трапеции, что было достаточно распространенным планировочным приемом в наиболее значительных площадях Ренессанса (площадь Капитолия, площадь перед собором св. Петра в Риме и др.). Данный прием создавал дополнительный визуальный эффект перспективного сокращения, зрительно увеличивая масштаб площади и придавая ей большую монументальность. Трапеция площади была расположена практически по оси Невского проспекта, завершая собой прямой луч, идущий от Адмиралтейства, а ее боковые грани, суживающиеся к противоположной стороне площади, как бы указывали дальнейшее направление движения. Основанием трапеции служил Лиговский канал, вскоре заключенный в трубу и превратив-

шийся в Лиговский проспект. От противоположной узкой стороны площади веером расходились улицы, как оммаж «трехлучию» основных планировочных осей Петербурга.

Площадь сохранила свое название по названию церкви, но ее статус и планировочные характеристики полностью изменились на привокзальные – церковь оказалась за ее пределами по другую сторону Лиговского канала (Лиговского проспекта).

Новым композиционным акцентом площади стало здание вокзала, занимающее южную боковую грань трапеции. Первый проект вокзала, выполненный в Департаменте путей сообщения архитектором Р.А. Желязевичем, был представлен на «Его Величества благоусмотрение» 17 февраля 1843 года одновременно с генеральным планом Знаменской площади архитектора Н. Е. Ефимова. Однако Император счел, что оно «в общем объеме своем недовольно пространно, и за сим ... представить новые проекты как расположения станции так и фасаду оной» [15, л.133].

Главноуправляющий ПС и ПЗ граф Клейнмихель во «всепопданнейшем докладе» предложил устройство своеобразного конкурса проектов, поясняя: «Проект сей представляя собственно для получения разрешения Вашего Императорского Величества в общих видах с тем, что я предполагаю таковой проект поручить сделать трем архитекторам: Брюллову, Тону и Ефимову. Проект этот по изготовлении буду иметь счастье представить Вашему Императорскому Величеству» [15, л.133].

В этом «закрытом» конкурсе победу, с некоторыми оговорками, одержал проект К.А. Тона,

получивший одобрение после устранения «высочайших замечаний» в начале 1844 года (рис. 4) [17]. Тогда же был одобрен и проект станционного здания в Москве, практически повторяющего центральную часть петербургского здания вокзала без боковых крыльев. Оба здания были

спроектированы архитектором на основе композиционной схемы «тупикового вокзала» и представляли собой как бы ширму, скрывающую со стороны города железнодорожные пути и дебаркадер.

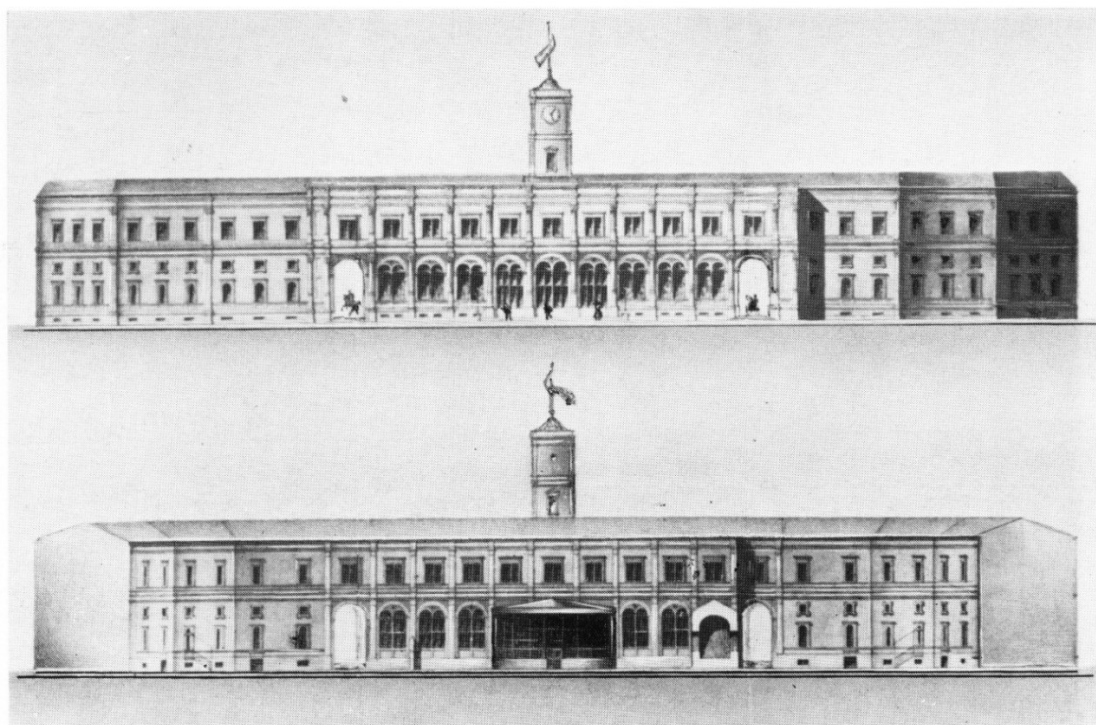


Рис. 4. Санкт-Петербург. Пассажирское здание Санкт-Петербургско-Московской железной дороги в Санкт-Петербурге. Проект, арх. К.А. Тон, 1844 г. [17]

Центральная часть здания вокзала полностью формировала всю южную боковую грань площади, а его боковые крылья следовали направлению выходящих из площади улиц: Гончарной с узкой стороны трапеции и Лиговского проспекта, являющегося ее широким основанием.

В архитектуре вокзала были использованы формы «неоренессанса», подчеркнутые мотивом высоких арочных окон с пилястрами между ними в первом этаже центральной части вокзала, выходящей на площадь. Башня с часами, ставшая впоследствии знаковым элементом вокзалов, отсылала к образу ратуши, служа архитектурным акцентом, выделяющим здание вокзала в общей застройке площади.

По плану урегулирования площади было «предназначено обстроить ее соответственными пассажирской станции четырехэтажными зданиями, по Высочайше утвержденным фасадам» [15, л. 163]. Проекты частных домов, разработанные архитектором Ефимовым одновременно с проектом планировки площади, были выдержаны, как и здание вокзала, в формах «неоренессанса» в

масштабном строе ансамбля с арочными окнами в первом этаже. Общий для всех зданий, обрамляющих площадь, ритм этих окон создавал эффект открытой аркады, ассоциирующейся с площадями итальянского Возрождения.

Владельцам домов, выходящих фасадами на площадь, предписывалось перестроить дома в соответствии с утвержденными фасадами. Так, жена Коллежского Ассесора Госпожа Кобылина должна была «возвести здание по Высочайше утвержденному 8 февраля 1845 года фасаду, и что без изменения сего фасада можно построить службы: не только каменные, но и деревянные, с тем, чтобы службы, которые будут обращены на площадь, были построены для большей благовидности за каменным забором высотой, превышающей высоту служб». Проект урегулирования площади предполагал, кроме того, некоторое уменьшение территории ее участка, в связи с чем завязалась длительная тяжба, материалы которой, хранящиеся в архиве, дали бесценный материал по истории формирования привокзальной площади [15].

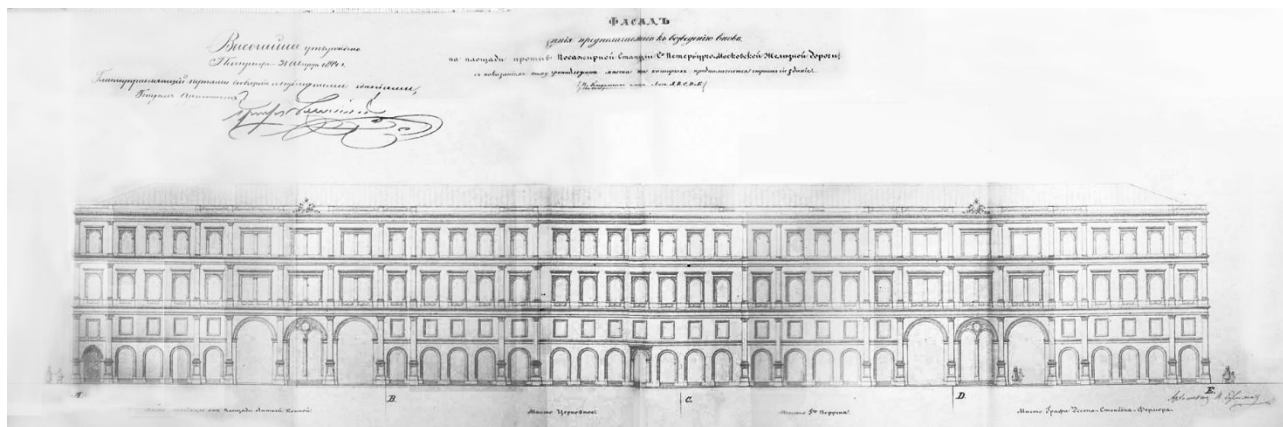


Рис. 5. Санкт-Петербург. Фасад здания, предполагаемого к возведению вновь на площади против Пассажирской станции С-Петербургско-Московской железной дороги. Проект, арх. Н.Е. Ефимов, 1844 г. (публикуется впервые) [15]

Часть владельцев домов, включая госпожу Кобылину, отказались перестраивать дома по утвержденным фасадам без соответствующей компенсации, в результате чего полностью осуществить формирование ансамбля Знаменской площади в середине XIX века не удалось, т.к. городские власти посчитали перестройку частных домов за свой счет неприемлемой.

Проблемы возникли и при постройке «ваксала, гостиницы и других заведений на месте по плану литеры А, ... купленном за счет сумм железной дороги» [15, л.1], которое должно было сформировать противоположную от вокзала боковую грань площади.

Первоначально право на постройку «ваксала – гостиницы» было предоставлено Санкт-Петербургскому купцу 2 гильдии Пономареву, от которого это право перешло к купцу 1-й гильдии Овсянникову. В письме на имя Главноуправляющего ПС и ПЗ Овсянников сетовал на то, что «хотя внутреннее расположение зданий предоставлено собственному моему усмотрению, но самое назначение зданий не только мне не предоставлено, но напротив, здание против станции предназначено исключительно для гостиницы и других заведений». В ответе ему было указано, что возведение этих зданий предположено исключительно для урегулирования пассажирской площади» и в смягчении регламента отказано. [15, л.13]

В условиях оговаривалось «чтобы здание на месте литеры А непременно было возведено вчерне в нынешнем же году, и окончено чистою отделкой не позже 1849 г., дабы ко времени открытия железной дороги совершенно были готовы помещения в нем для публики, приезжающей по железной дороге, равным образом и другое здание на Лиговский канал было непременно окончено к предполагаемому Овсянниковым сроку, т. е. в 1850 году. Главноуправляющий Пу-

тей сообщения и Публичных зданий граф Клейнмихель в докладе Николаю I «находя, что все сии условия с удобностью могут быть допущены, всеподданнейше испросил Монаршего соизволения, на предоставление постройки зданий противу пассажирской станции Санкт-Петербург – Московской железной дороги Коллежскому Советнику Графу Эссен-Стенбок Фермору на изъясненных основаниях». На что последовала положительная резолюция «Государя Императора» [15, л.39].

В результате здание «ваксала» было построено к 1857 году графом Эссен Стенбок-Фермором по проекту, разработанному архитектором А. П. Гемилианом на основе ранее утвержденного Императором проекта архитектора Н.Е. Ефимова (ныне гостиница «Октябрьская»). Фасады этого здания повторяли декор вокзала и общий ритм аркад, обрамляющих площадь.

Конкурсы на перестройку Николаевского вокзала в начале XX века.

К началу XX века с бурным ростом населения Санкт-Петербурга и соответствующим увеличением пассажиропотока, возросшим требованиям перестало удовлетворять не только здание вокзала, но и площадь перед ним [18]. Проблема усугубилась возведением в 1909 году в центре Знаменской площади памятника Александру III и прокладкой трамвайного кольца вокруг него. Паровой трамвай – предшественник электрического, начавший курсировать от Знаменской площади до села Мурзинка в конце 1860-х гг., проходил через арку в доме Фредерикса (сейчас лиговское крыло гостиницы «Октябрьская»), устроенной для выхода 1-й Рождественской улицы (ныне ул. 1-я Советская) к Лиговскому каналу, что доставляло его жителям огромные неудобства.

Власти города считали, что «для городского благоустройства настоятельно необходимо,

чтобы Николаевский вокзал, занимающий центральное место в столице и являющийся начальной точкой величайшего железнодорожного пути в мире, прорезающего два материка и соединяющего два океана, выходил своим фасадом не на затесненную площадь, а на площадь таких размеров, которая бы вполне отвечала как величию

столицы Империи, так и грандиозности всего сооружения, конечным звеном которого является Николаевский вокзал, для этого надо существующее здание отодвинуть внутрь железнодорожного дворового участка, увеличив за его счет до необходимых размеров Знаменскую площадь» [19].



Рис. 4. Знаменская площадь в Санкт-Петербурге перед Николаевским вокзалом. Литография Л.Ж. Жакоте и Обрена по рисунку И.И. Шарлеманя. 1855–1859 [5]

Большое значение, придававшееся зданию Николаевского вокзала и его привокзальной площади вызвало целый ряд конкурсов и проектов. В 1906 г. был объявлен Всероссийский конкурс, в котором участвовали 14 проектов, шесть из которых были признаны победителями, но в силу различных недостатков ни один из них не был принят к реализации; в 1909 году, вследствие неудовлетворительных результатов первого конкурса, при Министерстве Путей Сообщения был создан специальный Комитет, поручивший проектирование профессору архитектуры А. Н. Померанцеву, с условием сохранения фасада здания. Проект был рассмотрен Императорской Академией художеств 24 января, а его вариант 28 февраля, и как проект, так и вариант признаны удовлетворительными. При этом председатель Комиссии по рассмотрению проектов проф. архитектуры Л. Н. Бенуа высказал мнение, что «здание Николаевского вокзала не обладает художественными достоинствами и должно быть снесено, а новое здание отодвинуто на 10 саженей назад для уширения Знаменской площади» [20].

В результате 4 мая 1911 года Инженерный Совет МПС отклонил проект Померанцева, и

признал необходимым организацию нового ограниченного конкурса. Причем конкурсантам предоставлялся уже разработанный в МПС, на основании предыдущих проектов, план, которым, в частности предполагалось отодвинуть фасадную линию здания вокзала на 12 саженей (25,56 м) вглубь участка Николаевской железной дороги для устройства перед ним обособленного пассажирского двора (по примеру незадолго до того построенного Витебского вокзала). К участию в конкурсе были привлечены архитекторы А. А. Барышников, А. А. Гречанников, Ф. И. Лидваль, И. А. Фомин и В. А. Щуко. Их проекты после одобрения Инженерным Советом МПС были направлены в Императорскую Академию художеств для «разсмотрения их в художественном отношении» [20]. Комиссия Академии художеств рекомендовала для дальнейшей проработки проекты Ф. И. Лидваля, И. А. Фомина и В. А. Щуко, выполненные в модном тогда в Петербурге неоклассическом стиле. После состоявшегося 26 ноября 1912 года Собрания Академии художеств, в разработку был принят проект В. А. Щуко, предусматривающий, помимо организации тоннелей для доставки багажа и специального тоннеля для пассажиров с выходами на все промежу-

точные платформы и на двор прибытия, в дополнение к площади перед лицевым фасадом, устройство полукруглого двора для пассажиров III класса со стороны Лиговского проспекта, частично реализованный в настоящее время.

Реализации проекта перестройки вокзала и расширения площади помешали начавшаяся вскоре Первая мировая война и революция. В настоящее время Площадь Восстания (бывшая Знаменская площадь) является одним из самых напряженных транспортных узлов Санкт-Петербурга.

Выводы

1. Выявлены три основных фактора, повлиявших на выбор места размещения вокзала Санкт-Петербургско-Московской железной дороги (Николаевского, ныне Московского) и ее привокзальной площади, к которым относятся:

- важное градостроительное значение в структуре города на пересечении основных магистралей;

- наличие незастроенных территорий двух площадей: Знаменской и Александровской, которые были использованы для размещения станции, вокзала и привокзальной площади;

- окраинное положение территории, дающее возможность отчуждения земли для нужд железной дороги с меньшими затратами, в связи с ее меньшей, по сравнению с центром города, стоимостью.

2. Показано, что Знаменская площадь, создававшаяся в период господства эклектики в архитектуре, когда традиции ансамблевого строительства ушли в прошлое, является последним по времени создания градостроительным ансамблем, создававшимся на основе принципов периода классицизма по единому проекту, включающему весь фронт формирующих ее зданий.

3. Установлено, что Знаменская площадь является уникальным градостроительным явлением, поскольку в истории архитектуры XIX века больше не известен факт создания привокзальной площади, задуманной как единый регулярный ансамбль.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батырев В.М. Вокзалы. Москва: Стройиздат, 1988. 216 с.
2. Градостроительство России середины XIX – нач. XX в.: Общая характеристика и теоретические проблемы. / НИИ теории архитектуры и градостроительства; под общ. ред. Е.И. Кириченко. Москва: Прогресс-Традиция, 2001. Книга 1. 340 с.
3. Зитте Камилло. Художественные основы градостроительства. Москва: Стройиздат, 1993. 255 с.
4. Семенцов С.В. Славина Т.А., Антонов В., Векслер А. Комплекс сооружений ВСМ и проблемы городской среды современного Петербурга. Опыт градостроительной экспертизы. // Инженер путей сообщения: приложение к газете «Наш путь» №3(4), 1996. С. 84–93.
5. Пунин А.Л. Архитектура Петербурга середины и второй половины XIX века. Том 1. 1830-1860-е годы. Ранняя эклектика. Санкт-Петербург: Изд-во «Крига», 2009. 592 с.
6. Глазырин, В.А. Инженер путей сообщения. Преподаватель Петроградской школы Путей сообщения. Пассажиры здания. Петроград: Типо-литография Петроградского Округа Путей сообщения, Фонтанка, 117, 1918. 120 с.
7. Джонс Колин. Париж: биография великого города. Москва: Эксмо; Мидгард, 2007. 734 с.
8. Les Grandes Gares Parisiennes du XIX siecle”. Sous la direction de Karen Bowie, 1987. 204 p.
9. Simmons Jack. St. Pancras station. London: George Allen and Unwin Ltd, 1968. 120 p.
10. Петухова Н.М. Площадь трех вокзалов. Архитектурная биография. Санкт-Петербург: Изд-во «Остров», 2005. 155 с.
11. Семенцов С.В., Шаблаева Н.К. Размещение объектов российской армии и градостроительное развитие Санкт-Петербурга в XVIII-XIX веках. // Петербургские чтения – 98. Санкт-Петербург и вооруженные силы. Санкт-Петербург, 1998. С. 102–107.
12. Мурашова Н.В. Федор Демерцов. Санкт-Петербург: «Белое и черное», 2002. 186 с.
13. План Александровской (Знаменской) площади около церкви Знамения на песках: копия, тушь, бумага 42х62, 1830 г. // РГИА. Ф.1487. Оп.1. Ед. хр. 2. Л. 1.
14. Дело об утверждении проекта часовни и ограды при церкви Входа Господня во Иерусалим (Знаменской церкви) на углу Невского пр. и Знаменской улицы: фасад, разрез, поэтажные планы часовни, фасад решетки, фасад и разрез воротного столба: копия: тушь, акв. бум. 39х338, 1860-1863 гг. // РГИА. Ф. 218. Оп. 4. Ед. хр. 934. Л. 1–26.
15. Дело Департамента искусственных дел о постройке купцом Пономаревым зданий для гостиницы и др. торговых заведений на Знаменской площади перед пассажирской станцией Петербурго-Московской железной дороги: планы части Петербурга с указанием места, фасады торговых домов и гостиницы: копии, тушь, акв. бумага, 1845–1851 гг. // РГИА. Ф.218, Оп.3, Ед. хр. 570. 384 л.
16. Пассажирское здание на станции Петербург. Арх. К. А. Тон. Планы нижнего и верхнего

этажей, материалы по отчуждению земельных участков под постройку вокзала: ватман, печатн., 1844-1847 гг. // РГИА. Ф.350. Оп.31. Ед. хр. 290. Л. 1–25.

17.Славина Т.А. Константин Тон. Ленинград: Стройиздат, 1989. 224 с.

18.Петухова Н.М. Архитектура вокзалов как феномен повседневной культуры (конкурсы начала XX века на проект перестройки Николаевского вокзала в Петербурге) // Феномен повседневности: гуманитарные исследования: материалы международной научной конференции

«Пушкинские чтения – 2005». Санкт-Петербург: Астерион, 2005. С. 81–87.

19.Проект переустройства пассажирского вокзала станции Петербург. Пояснительная записка, план Знаменской площади, разценочная ведомость стоимости работ: печатн., 1911-1913 гг. // РГИА. Ф. 350. Оп. 31. Ед. хр. 300. 142 л.

20.Дело о переустройстве Николаевского вокзала в Петербурге, 1911–1913 // РГИА. Ф. 288. Оп. 5. Ед. хр. 84. Л. 1–14.

Информация об авторах

Петухова Нина Михайловна, кандидат искусствоведения, доцент кафедры Архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: mama8nina@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 15.03.2021 г.

© Петухова Н.М., 2021

Petukhova N.M.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: mama8nina@yandex.ru

CREATING OF THE ARCHITECTURAL ENSEMBLE OF THE ZNAMENSKAYA STATION SQUARE IN ST PETERSBURG

Abstract. *The history of the formation of the railway station Znamenskaya Square (now Vosstaniya Square) in St. Petersburg is considered. The square appeared in front of the station of the first main railway in Russia, which connected the two capitals – the old and new-Moscow and St. Petersburg (since 1855 – the Nikolaevskaya Railway, since 1923 – the Oktyabrskaya Railway). The state status of the road also determined the status of the station square in front of its main station in St. Petersburg. The square was created as one of the main urban planning ensembles of the city, the formation of which was paid attention at the highest level. Extensive archival sources, extracts and graphic materials are studied and presented in this article. Based on the historical and urban planning analysis, the main factors that influenced the choice of the location of the station of the St. Petersburg-Moscow railway and its station square in St. Petersburg are identified. It is shown that Znamenskaya Square is one of the last urban planning ensembles of St. Petersburg, created centrally based on classical principles according to a single project, including the entire front of the buildings forming it. The Znamenskaya Square is a unique urban planning phenomenon, since in the history of 19th century architecture, the fact of the creation of the station square, conceived as a single regular ensemble, is no longer known.*

Key words: *Znamenskaya square, station square, town-planning ensemble, Aleksandrovskaya square in St. Petersburg, regular square, architect Efimov N. E.*

REFERENCES

1. Batyrev V.M. Railway stations [Vokzaly]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 216 p. (rus)

2. Kirichenko E.I. (total. ed.) Urban planning in Russia in the middle of the XIX - early XX century: General characteristics and theoretical problems. Vol. 1. [Gradostroitel'stvo Rossii serediny XIX – nach. XX v.: Obshchaya harakteristika i teoreticheskie problem]. Moscow: Progress-Tradition, 2001. 340 p. (rus)

3. Sitte Camillo. Artistic foundations of urban planning. [Hudozhestvennyye osnovy

gradostroitel'stva]. Moscow: Stroyizdat, 1993. 255 p. (rus)

4. Sementsov S.V., Slavina T.A., Antonov V., Veksler A. The complex of high-speed railway structures and problems of the urban environment of modern St. Petersburg. Experience in urban planning expertise. [Kompleks sooruzhenij VSM i problemy gorodskoj sredy sovremennogo Peterburga. Opyt gradostroitel'noj ekspertizy]. Inzhener putej soobshcheniya: prilozhenie k gazete «Nash put'». 1996. No. 3 (4). Pp. 84–93. (rus)

5. Punin A.L. The architecture of St. Petersburg in the middle and second half of the 19th century. Vol. 1. 1830-1860s. Early eclecticism. [Arhitektura Peterburga serediny i vtoroj poloviny XIX veka. Tom 1. 1830-1860-e gody. Rannyya eklektika]. St.Petersburg: "Kriga", 2009. 592 p. (rus)

6. Glazyrin, V.A. Passenger buildings. [Passazhirskie zdaniya]. Petrograd: Typo-lithograph of the Petrograd Okrug of Ways of Communication, Fontanka, 117, 1918. 120 p. (rus)

7. Jones Colin. Paris: biography of the great city. [Parizh: biografiya velikogo goroda]. Moscow: Eksmo; Midgard, 2007. 734 p. (rus)

8. Bowie Karen. Les Grandes Gares Parisiennes du XIX siecle, 1987. 204 p. (french).

9. Simmons Jack (ed.). St. Pancras station. London: George Allen and Unwin Ltd, 1968. 120 p. (eng)

10. Petukhova N.M. The area of three stations. Architectural biography. [Ploshchad' trekh vokzalov. Arhitekturnaya biografiya]. St.Petersburg: "Ostrov", 2005. 155 p. (rus)

11. Sementsov S.V., Shablaeva N.K. Placement of objects of the Russian army and urban development of St. Petersburg in the 18th-19th centuries. [Razmeshchenie ob"ektov rossijskoj armii i gradostroitel'noe razvitie Sankt-Peterburga v HVIII-XIX vekah.]. Peterburgskie chteniya – 98. Sankt-Peterburg i vooruzhennyye sily. Saint-Petersburg, 1998. Pp. 102–107. (rus)

12. Murashova N.V. Fedor Demertsov. [Fedor Demercov]. St. Petersburg: "White and Black", 2002. 186 p. (rus)

13. Plan of Aleksandrovskaya (Znamenskaya) Square near the Church of the Sign on the Sands: copy, ink, paper 42x62, 1830. [Plan Aleksandrovskoj (Znamenskoj) ploshchadi okolo cerkvi Znameniya na peskah: kopiya, tush', bumaga 42h62, 1830 g.]. RGIA, coll. 1487, aids 1, foll. 2. P. 1. (rus)

14. The case of approving the project of the chapel and fence at the Church of the Entry of the Lord into Jerusalem (Church of the Sign) at the corner of Nevsky Prospect and Znamenskaya Street: facade, section, floor plans of the chapel, grille facade, facade and section of the gate pillar: copy: ink, aqu., boom. 39x338, 1860-1863. [Delo ob utverzhdenii proekta chasovni i ogrady pri cerkvi Vhoda Gospodnya vo Ierusalim (Znamenskoj cerkvi) na uglu Nevskogo pr. i Znamenskoj ulicy: fasad, razrez, potazhnye plany chasovni, fasad reshetki, fasad i razrez vorotnogo stolba: kopiya: tush', akv. bum. 39h338, 1860–1863 gg.]. RGIA, coll. 218, aids. 4, fol. 934. Pp. 1–26. (rus)

15. The case of the Department of Artificial Affairs on the construction of buildings for a hotel and other trading establishments by merchant Ponomarev on Znamenskaya Square in front of the passenger station of the Petersburg-Moscow railway: plans of a part of Petersburg with an indication of the location, facades of trading houses and a hotel: copies, ink, aqu. paper, 1845–1851. [Delo Departamenta iskusstvennyh del o postrojke kupcom Ponomarevym zdaniy dlya gostinicy i dr. torgovyh zavedenij na Znamenskoj ploshchadi pered passazhirskoj stanciej Peterburgo-Moskovskoj zheleznoj dorogi: plany chasti Peterburga s ukazaniem mesta, fasady torgovyh domov i gostinicy: kopii, tush', akv. bumaga, 1845–1851 gg.]. RGIA, coll. 218, aids.3, fol. 570. 384 p. (rus)

16. Passenger building at the Petersburg station. Arch. K. A. Ton. Plans of the lower and upper floors, materials for the alienation of land plots for the construction of the station. Whatman, printed. [Passazhirskoe zdanie na stancii Peterburg. Arh. K. A. Ton. Plany nizhnego i verhnego etazhej, materialy po otchuzhdeniyu zemel'nyh uchastkov pod postrojku vokzala: vatman, pechatn., 1844-1847 gg.]. RGIA, coll. 350, aids. 31, fol. 290, 1844-1847. Pp. 1–25. (rus)

17. Slavina T.A. Konstantin Ton. [Konstantin Ton]. Leningrad: Stroyizdat, 1989. 224 p. (rus)

18. Petukhova N.M. The architecture of railway stations as a phenomenon of everyday culture (competitions at the beginning of the twentieth century for the project of rebuilding the Nikolaevsky railway station in St. Petersburg). [Arhitektura vokzalov kak fenomen povsednevnoj kul'tury (konkursy nachala HKH veka na proekt perestrojki Nikolaevskogo vokzala v Peterburge)]. Fenomen povsednevnosti: gumanitarnye issledovaniya: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Pushkinskie chteniya – 2005». St. Petersburg: Asterion, 2005. Pp. 81–87. (rus)

19. Reconstruction project of the passenger station of the Petersburg station. Explanatory note, plan of Znamenskaya Square, valuation sheet of the cost of work: printed, 1911–1913. [Proekt pereustroystva passazhirskogo vokzala stancii Peterburg. Poyasnitel'naya zapiska, plan Znamenskoj ploshchadi, razchenochnaya vedomost' stoimosti rabot: pechatn., 1911–1913 gg.]. RGIA, coll. 350, aids. 31, fol. 300. 142 p. (rus)

20. The case of the reorganization of the Nikolaev railway station in St. Petersburg, 1911-1913. [Delo o pereustroystve Nikolaevskogo vokzala v Peterburge, 1911–1913]. RGIA, coll. 288, aids. 5, fol. 84. Pp. 1–14. (rus)

Information about the authors

Petukhova, Nina M. PhD. E-mail: mama8nina@yandex.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, st. 2 Krasnoarmeyskaya, 4.

Received 15.03.2021

Для цитирования:

Петухова Н.М. Формирование градостроительного ансамбля привокзальной знаменской площади в Санкт-Петербурге // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 50–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-50-62

For citation:

Petukhova N.M. Creating of the architectural ensemble of the znamenskaya station square in St Petersburg. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 50–62. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-50-62

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-63-70

Борисов И.Н., *Стронин А.А.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: alexanderstronin@yandex.ru*

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ АССОРТИМЕНТОВ ДВУХШАРОВОЙ МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ОТКРЫТОГО ЦИКЛА

Аннотация. Шаровая мельница имеет энергетический коэффициент полезного действия не более 3,5 % (с учетом принятых мер по интенсификации процесса измельчения материала). Это обусловлено несовершенством конструкции помольного агрегата, заключающейся в том, что исключена возможность полностью преобразовать накопленную мелющей загрузкой механическую энергию в энергию измельчения (т.е. энергию, непосредственно затрачиваемую на разрушение частиц материала). Большая часть накопленной энергии преобразуется в тепло, шум и вибрацию. Существующие на сегодняшний день направления интенсификации процесса измельчения следующие: совершенствование конструкции, внутренней оснастки цементной мельницы; изменение физико-химических свойств среды измельчения; совершенствование схемы измельчения. Авторы данной статьи работают в направлении совершенствования внутренней оснастки, что находит отражение в научно обоснованном выборе ассортимента мелющих тел для камеры тонкого измельчения, т.к. рациональная по составу мелющая загрузка позволяет значительно снизить энергоемкость процесса измельчения. Авторами продолжается исследование возможности использования в камере тонкого помола двухшаровой загрузки. В данной статье проводится краткий обзор разных ассортиментов двухшаровых мелющих загрузок, отличающихся друг от друга только ассортиментом мелющих тел. Показана возможность значительного увеличения производительности мельницы при замене традиционной мелющей загрузки на рациональную по составу двухшаровую.

Ключевые слова: клинкер, производительность, индекс измельчаемости, двухшаровая мелющая загрузка, шаровая мельница, дисперсные характеристики клинкера.

Производство цемента сопряжено с большими энергетическими затратами, которые составляют около 110 кВт·ч/т цемента, при этом только 40–50 % (в зависимости от способа и культуры производства) приходится на цех помола цемента, т.е. на измельчение клинкера в среднем расходуется 40 ± 5 кВт·ч/т [1]. Данные цифры показывают всю необходимость в совершенствовании процесса тонкого измельчения клинкера. Высокое значение удельных энергозатрат, связанных с тонким помолом цемента, объясняется в первую очередь, недостаточным совершенством конструкции самих помольных агрегатов, т.к. в большинстве случаев используются трубные шаровые мельницы, имеющие очень низкий к.п.д. не более 3,5 %. Широкому распространению шаровых мельниц способствуют такие положительные характеристики как: простота конструкции, высокая надежность работы, низкая металлоемкость, высокая производительность, возможность измельчать материал различной твердости и влажности (для материала с высокой влажностью перед мельницей устанавливают сушилку) [2].

Помимо несовершенства конструкции помольных агрегатов высокое потребление электроэнергии мельницей обусловлено низкой размалываемостью измельчаемого клинкера. Под

размалываемостью понимается количество электроэнергии потребляемой помольным агрегатом, для измельчения материала от начальной крупности до заданной [3]. Согласно методике ГИПРОЦЕМ [1, 4] клинкер относится к сравнительно трудноизмельчаемым материалам. Измельчаемость клинкера зависит в основном от его минералогического состава и режима обжига во вращающейся печи, а также от режима последующего охлаждения [5].

На сегодняшний день существует три основных направления по интенсификации процесса измельчения клинкера в помольных агрегатах:

- 1) Создание новых и совершенствование внедренных на производство помольных агрегатов;
- 2) Изменение физико-химических свойств среды измельчения в сторону повышения размолоспособности цемента;
- 3) Совершенствование схем измельчения.

К первому направлению относится создание принципиально новых помольных агрегатов, к которым можно отнести относительно недавно созданные и успешно себя зарекомендовавшие мельницы Horomill, пресс-валковый измельчитель [6–8]. Также сюда следует отнести совершенствование конструкции уже созданных по-

мольных агрегатов. В рамках данного направления проводятся исследования по совершенствованию внутренней оснастки мельниц. В частности, для шаровых мельниц это заключается в подборе оптимальной по составу мелющей загрузки [9, 10], позволяющей повысить размолоспособность цемента; усовершенствование профиля бронефутеровок [11, 12]; разработка и усовершенствование энергообменных устройств [13–14]; создание мелющих тел нетрадиционной формы (на сегодняшний день существует очень большое количество подобных мелющих тел, в качестве примера можно привести патенты [15, 16] на мелющие тела нетрадиционной формы). Помимо всего прочего сюда же относится и совершенствование конструкции сепараторов.

Физико-химические свойства среды измельчения такие как: электропроводность, влажность, наличие поверхностно-активных веществ, температура внутреннего пространства мельницы, аспирационного воздуха заметно влияют на кинетику процесса тонкого измельчения материала в мельнице. Введение в процессе измельчения материала поверхностно-активных веществ сопровождается заметным увеличением размолоспособности материала, за счет эффекта Ребиндера (который наблюдается преимущественно в камере грубого измельчения) и создания на поверхности вновь образующихся частиц адсорбционного слоя, состоящего из молекул ПАВ, обращенных своими неполярными углеводородными «хвостами» в сторону среды измельчения, что предотвращает агрегацию частиц [17].

В качестве ПАВ используют не только органические вещества, являющиеся отходами производств [18, 19], но и специально разработанные комплексы [20], состоящие из органических соединений, относящихся к разным классификационным группам веществ, помимо этого могут использоваться растворы органических веществ, например, растворы триэтаноламина, глицерина, диэтиленгликоля.

Электропроводность среды измельчения очень важный параметр, сильно влияющий на степень агрегации и адгезии материала, а, следовательно, и на его размолоспособность. Установлено, что чем ниже значение данного параметра, тем больше степень агрегации и адгезии. Электропроводность среды измельчения тесно связана с величиной поверхностного заряда частиц, если среда по своим свойствам является диэлектриком, то в процессе измельчения материала, поверхностные заряды на частицах не будут стекать через мельницу, что вызывает сильную адгезию и агрегацию. Повысить электропроводность можно увеличив влажность аспирацион-

ного воздуха; как вариант провести его озонирование, а также используя устройство по нейтрализации поверхностных зарядов, разработанную фирмой Экофор [21].

Из всего выше сказанного следует, что научные исследования в рамках данного направления связаны с разработкой высокоэффективных интенсификаторов помола (синтез новых ПАВ, создание различных вариантов сочетания ПАВ между собой, т.е. создание комплексов ПАВ), поиском способов по нейтрализации поверхностных зарядов.

К третьему направлению исследований относится усовершенствование имеющихся на сегодняшний день, схем измельчения, а также создание принципиально новых. В данном случае исследования в основном нацелены на создание таких схем измельчения, которые характеризуются меньшей металлоемкостью, меньшим суммарным расходом электроэнергии, потребляемой в целом всем помольным цехом, увеличением размолоспособности измельчаемого материала. Этого можно достичь благодаря созданию помольного комплекса, состоящего из рационально подобранных друг к другу помольного и вспомогательного оборудования разных типов и моделей [22].

Как правило, внедрение принципиально новых по конструкции мельниц всегда сопряжено с изменением схемы измельчения, так, например, при использовании тарельчато-валковой мельницы, представляющей по своей сути объединение под одним корпусом помольного агрегата мельницы тонкого измельчения и сепаратора, уменьшается количество промежуточных транспортирующих устройств (элеваторов, аэрожелобов), при этом отсутствует необходимость в использовании предизмельчителя. Находит широкое применение также совместное использование традиционной шаровой мельницы и принципиально нового по конструкции измельчителя, как пример можно привести двухстадийную схему измельчения с роллер-прессом на первой стадии измельчения [23].

Авторы данной статьи продолжают исследования по созданию оптимального по составу двухшаровой мелющей загрузки для камеры тонкого измельчения, позволяющей снизить энергоемкость всего процесса помола.

Цель исследований: изучить влияние на дисперсные характеристики клинкера разных ассортиментов двухшаровых мелющих загрузок.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– Составить различные ассортименты двухшаровых мелющих загрузок, отличающихся друг от друга ассортиментом размольных тел,

при этом обеспечив сохранение таких основных характеристик мелющих загрузок, как коэффициент загрузки, энерговооруженность;

- Осуществить помол клинкера на выбранных ассортиментах мелющих загрузок и в течение всего процесса измельчения проводить измерения величины удельной поверхности и полного остатка на сите №008;

- По завершению процесса измельчения математическим способом рассчитать индекс измельчаемости;

- На основе полученных данных провести аналитический сравнительный анализ, с целью установления рационального ассортимента мелющей загрузки.

Методика исследований. Исследования проводили на клинкере завода ЗАО «Осколцемент». Измельчение клинкера осуществляли в лабораторной мельнице ГИПРОЦЕМ 0,5×0,28 м в отсутствие гипса. Материал перед каждым измельчением просеивали через набор стандартных сит с целью выделения класса -5+1,25 мм, который затем поступал на помол в мельницу.

Вначале клинкер измельчался в первой камере лабораторной мельницы, в которую была загружена плотная шаровая упаковка (ПШУ), разработанная профессором кафедры Технологии цемента и композиционных материалов Барбаниягрэ В.Д. на базе университета БГТУ им. В. Г. Шухова [24], основные характеристики которой следующие: общая масса мелющей загрузки 55 кг; коэффициент заполнения мельницы 0,2; ПШУ состоит из шаров диаметром 74 мм и 54 мм, взятых в отношении по массе как 2:1.

После измельчения клинкера в I камере мельницы из нее извлекалась ПШУ и загружалась одна из исследуемых в рамках данной работы двухшаровых загрузок, затем процесс измельчения продолжался. При этом общая масса мелющих тел составляла 55 кг и с коэффициентом заполнения мельницы 0,2. Общее время измельчения в мельнице 40 мин, из этого времени 10 мин измельчение происходит в первой камере, а оставшееся время во второй, т.е. 30 мин.

В данной работе клинкер, измельченный на одном из ассортиментов мелющих загрузок, обозначается номером ассортимента данной загрузки, например, если клинкер был измельчен на двухшаровой мелющей загрузке МЗ II, то клинкер обозначается как образец (клинкер) №2.

Из рис. 1 видно, что клинкера № 1 и 2 после измельчения в I камере имеют одинаковое значение удельной поверхности равное 151 м²/кг, в то

же время образцы под номерами 3 и 6 обладают $S_{уд}=123$ м²/кг, а клинкера № 4 и 5 – 114 м²/кг. Через 10 мин помола во второй камере у клинкеров под номерами 1, 2 происходит увеличение удельной поверхности на 171 м²/кг, т.е. $S_{уд}= 322$ м²/кг, такое же значение данного показателя имеют клинкера № 3 и 6 (у обоих прирост удельной поверхности составил 199 м²/кг). У образцов под номерами 4 и 5 за 10 мин измельчения произошло увеличение $S_{уд}$ на 166 м²/кг и составила 280 м²/кг. Спустя еще 10 мин помола во второй камере мельницы клинкера № 1, 2, 3, 4 и 5 имеют одинаковую удельную поверхность равную 373 м²/кг (в данном случае прирост у клинкеров 1, 2 и 3 составил 51 м²/кг, а у клинкеров № 4 и 5 – 93 м²/кг). Образец № 6, получив за 10 мин измельчения прирост в 88 м²/кг, смог достигнуть значения удельной поверхности 410 м²/кг.

После измельчения в первой камере образцы № 1 и 2 имеют одинаковое значение полного остатка на сите № 008 равное 52 % (рис. 2), на данной стадии измельчения клинкера под номерами 4 и 5 также имеют одинаковые значения данного показателя – 58 %, в это же время образец №3 имеет самое низкое значение ΣR_{008} (48%), а образец №6 – наоборот обладает самым большим остяком на сите №008 равным 61%. Спустя 10 мин помола во второй камере остается только одна пара образцов, характеризующиеся одинаковыми значениями полного остатка на сите – это клинкера под номерами 2 и 4 ($\Sigma R_{008} = 5,1$ %), в данном случае у обоих образцов произошло уменьшение значения данного показателя примерно в 10 раз. При этом у клинкеров № 1; 3; 5 и 6 уменьшение составило примерно в 9; 16; 14,5 и 8 раз соответственно. На данной стадии измельчения видно, что образец №3 имеет самый низкий полный остаток на сите (3 %), а образец №6 наоборот имеет самый большой остаток на сите равный 9%.

Спустя 40 мин измельчения из рис. 2 отчетливо видно, что при последовательном замещении во второй камере мельнице ассортимента двухшаровой мелющей загрузки от МЗ III до МЗ VI, наблюдается ступенчатое возрастание величины полного остатка на сите №008 от 1 % (образец №3) до 6 % (образец №6). Самое высокое значение данного показателя наблюдается у клинкера №6 (ΣR_{008} уменьшился примерно в 1,5 раза), самое низкое – у клинкера №3 (ΣR_{008} уменьшился примерно в 3 раза). У образцов под номерами 1; 2; 4 и 5 произошло снижение величины данного показателя примерно в 3,5; 2; 2,5 и 1,3 раза соответственно.

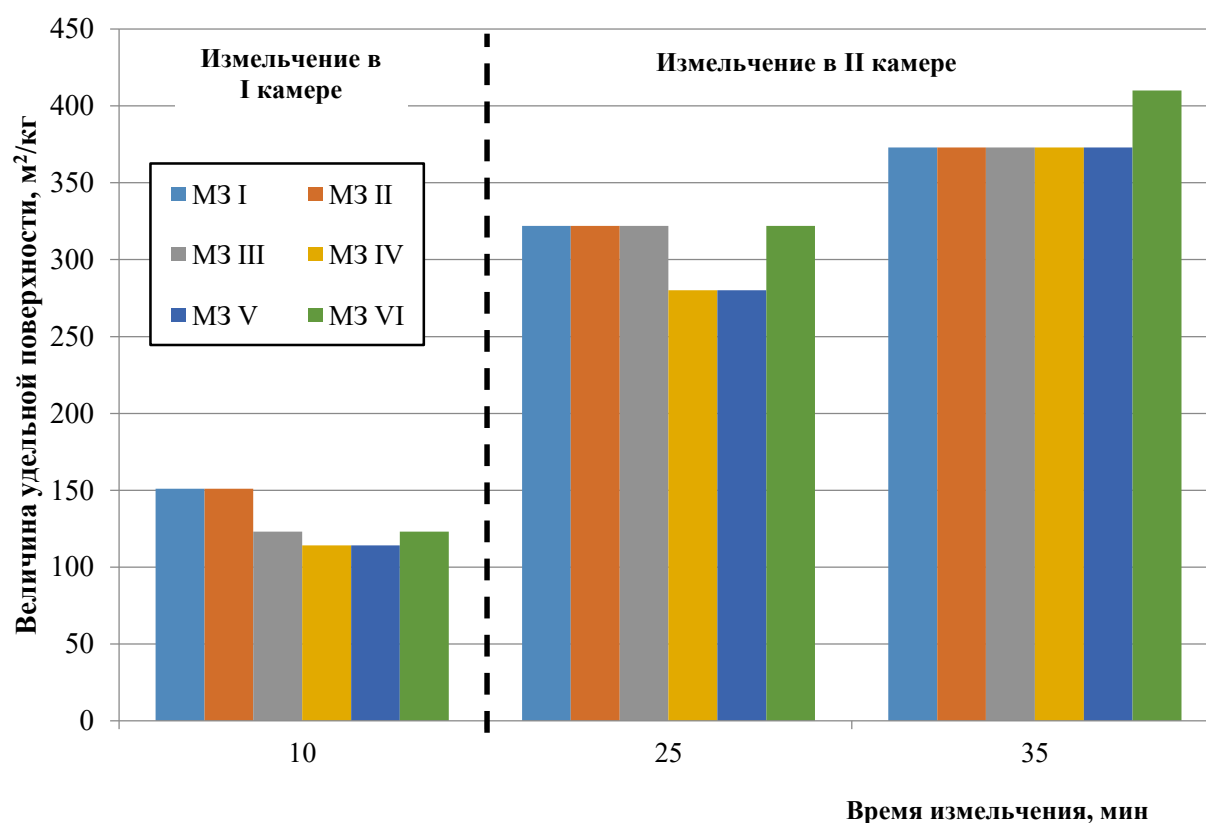


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности клинкера от ассортимента мелющей загрузки, использовавшейся в II камере

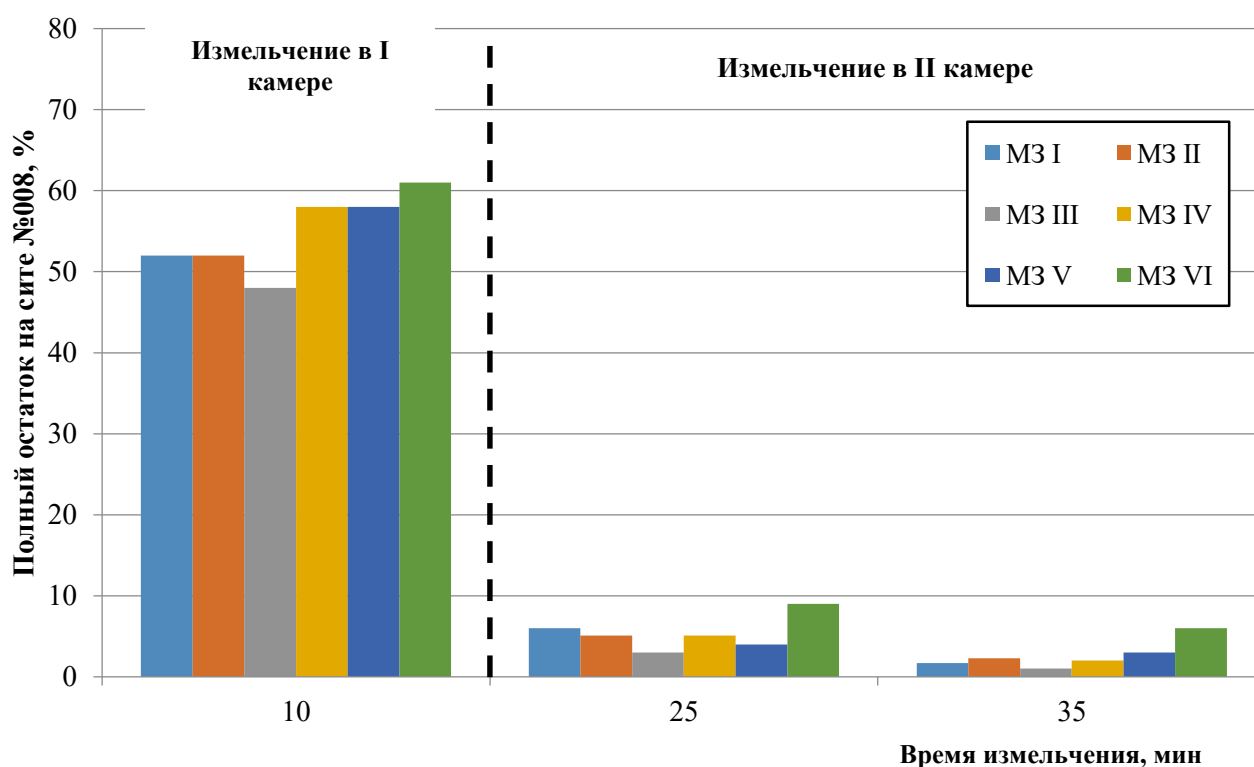


Рис. 2. Зависимость полного остатка клинкера на сите R008 от ассортимента мелющей загрузки, использовавшейся в II камере

По методике ГИПРОЦЕМ [1] были проведены расчеты удельной производительности (q) для всех образцов. Полученные результаты для наглядности представлены в виде графической

зависимости между данным показателем и ассортиментом использовавшейся во второй камере мельницы двухшаровой мелющей загрузки (рис. 3).

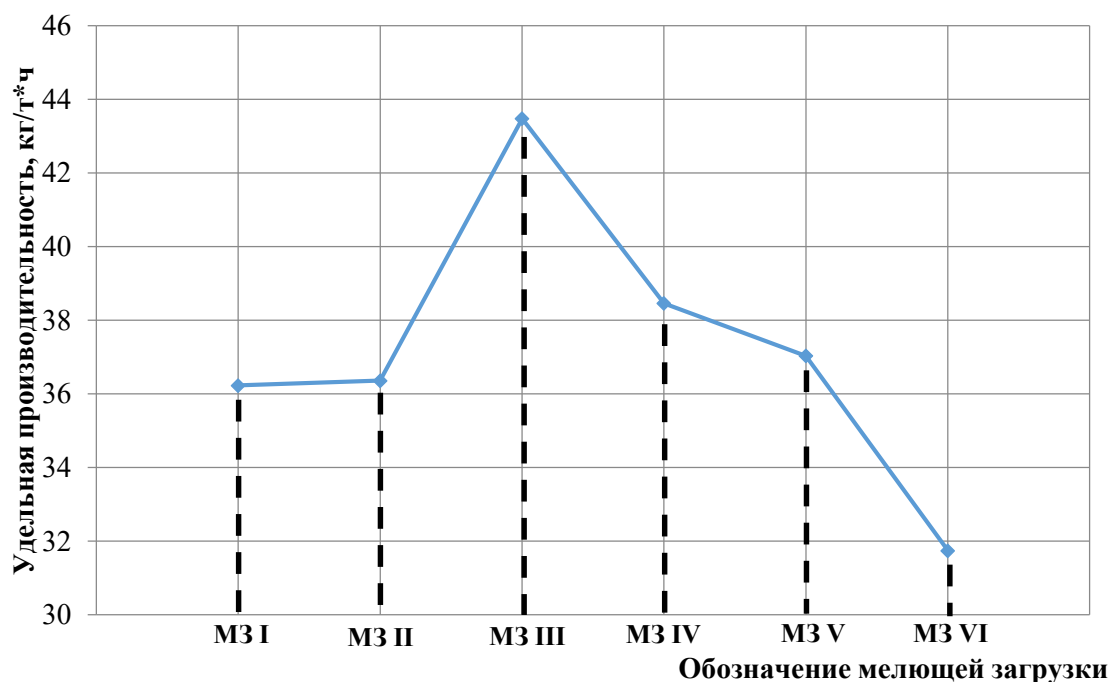


Рис. 3. Влияние ассортимента двухшаровой мелющей загрузки на удельную производительность мельницы

Из рис. 3 следует, что МЗ III обеспечивает значительное увеличение производительности мельницы. Использование других ассортиментов двухшаровых мелющих загрузок МЗ IV; МЗ V и МЗ VI приводит, наоборот, к существенному снижению производительности. В то же время МЗ I и МЗ II в малой степени влияют на значение данного показателя (рис. 3).

В ходе проведения научных исследований можно сделать следующие выводы.

- Исследованные ассортименты мелющих загрузок второй камеры мельницы не однозначно сказываются на таких дисперсных характеристиках как удельная поверхность и полный остаток на сите №008 на всем протяжении процесса измельчения (рис. 1 и 2);

- Двухшаровая мелющая загрузка ассортимента МЗ III обладает оптимальной по составу ассортиментом мелющих тел, что находит свое отражение в увеличении производительности мельницы (рис. 3);

- Применение двухшаровых загрузок других ассортиментов приводит либо к существенному уменьшению производительности мельницы, либо незначительно влияют на данный показатель.

Результаты, полученные в ходе проведения данной научно-исследовательской работы, позволяют судить о практической целесообразности применения в камере тонкого измельчения двухшаровой мелющей загрузки, которая на данном этапе разработки уже позволяет значительно снизить энергоемкость процесса помола клинкера. Помимо всего выше сказанного вытекает необходимость проведения дальнейших исследований

по созданию энергоэффективных двухшаровых загрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Пироцкий В.З. Цементные мельницы: технологическая оптимизация. СПб. Изд-во ЦПО «Информатизация образования», 1999. 145 с.
- Богданов В.С. Шаровые барабанные мельницы. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. 258 с.
- 3
4. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. 240 с.
5. Потапова Е.Н., Сулименко Л.М. Влияние природы цементного сырья на процессы структурообразования при обжиге клинкера // Е
6. Федотов П.К. Основная причина снижения энергопотребления при разрушении руды в роллер-прессах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №3. С. 309–314.
7. Эдет Э. Помольная установка HOROMILL // Цемент и его применение. 2012. №1. С. 188–192.
8. Эдет Э. Технология HOROMILL: двадцать лет эксплуатации в разных странах мира // Цемент и его применение. 2014. №1. С. 143–146.
- Барбаниягрэ В.Д., Стронин А.А. Влияние на гранулометрический состав клинкера ассортимента мелющих тел и интенсификатора помола // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №1. С. 71–75.
10. Стронин А.А., Барбаниягрэ В.Д. Увеличение производительности шаровой

мельницы открытого цикла использованием двухшаровой загрузки // Материалы X Международного форума с международным участием (01 – 15 октября 2018 г.). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. С. 1615–1619.

11. Пат. RU 2397813 C1, Российская федерация МПК B02C 17/22. Классифицирующая футеровка цементной мельницы / В.С. Богданов, Н.П. Несмеянов, Д.Г. Круговой; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". 2009102796/03; заявл. 28.01.2009; опубл.

12. Пат. RU 179532 U1, Российская федерация МПК B02C 17/22. Ступенчатая футеровка шаровой барабанной мельницы / П.А. Хахалев, В.С. Богданов, Ю.М. Фадин; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". 2017146870; заявл. 28.12.2017; опубл. 17.05.2018.

13. Цыркун А.В., Шатохин И.И., Влияние внутримельничных энергообменных устройств на улучшение работы цементных мельниц // Международная научно-практическая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгородский технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 1563–1566.

14. Тишкова И.С., Еремченко С.М. Внутримельничное энергообменное устройство // VII Международный молодежный форум "Образование, Наука, Производство" (20 – 22 октября). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 1551–1553.

15. Пат. RU 2642088 C1, Российская федерация МПК B02C 17/20. Мелющее тело / Г.А. Щепочкина; заявитель и патентообладатель Щепочкина Юлия Алексеевна. 2017100779; заявл. 10.01.2017; опубл. 24.01.2018.

16. Пат. RU 119645 U1, Российская федерация МПК B02C 17/20. Мелющее тело / Л.З. Писаренко, И.А. Бусел, Н.П. Метельский, П.И. Бусел; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Стройизыскания», Общество с ограниченной ответственностью «Ижгеострой-М» 2011122020/13; заявл. 31.05.2011; опубл.

Ходаков Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов. М.: Изд-во литературы по строительству 1972. 239 с.

18. Карибаев К. К. Поверхностно-активные вещества в производстве вяжущих материалов. – Алма-Ата: «Наука», 1980. 336 с.

19. Котов С.В., Прохоренко К.Л. Использование отходов нефтепереработки в качестве интенсификаторов помола цемента // Успехи в химии и химической технологии Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. 2010. Том 24. №6. С.58–61.

Шахова Л.Д. Черкасов Р.А. Интенсификация процесса измельчения клинкера с применением интенсификатора помола // Вестник белгородского технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 10–13.

21. Глухарев Н.Ф. Сухое измельчение в условиях электронеутрализации. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 192 с.

22. Шаратов Р.Р. Шаровые мельницы закрытого цикла. Белгород. Изд-во.: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. 270 с.

23. Иванов А.Н., Крот А.Ю., Крот О.П. Снижение энергоемкости трубных мельниц путем предизмельчения // Национальный технический университет «Харьковский политехнический университет». 2014. №7. С. 48–54.

Пат. 2477659, Российская федерация, МПК B02C 17/20. Шаровая загрузка барабанной мельницы / В.Д. Барбанягр; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". № 2010121271/13; заявл. 25.05.2010; опубл. 20.03.2013.

Информация об авторах

Борисов Иван Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Технологии цемента и композиционных материалов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Стронин Александр Анатольевич, аспирант кафедры Технологии стекла и керамики. E-mail: alexanderstronin@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.04.2021 г.

© Борисов И.Н., Стронин А.А., 2021

Borisov I.N., Stronin A.A.

INFLUENCE OF DIFFERENT ASSORTMENT OF TWO-BALL GRINDING LOAD ON THE PERFORMANCE OF AN OPEN-CYCLE BALL MILL

Abstract. The ball mill has an energy efficiency of no more than 3.5 % (taking into account the measures taken to intensify the process of grinding the material). This is due to the imperfection of the design of the grinding unit, which consists in the fact that it is impossible to completely convert the mechanical energy accumulated by the grinding load into grinding energy (i.e., energy directly spent on the destruction of material particles). Most of the stored energy is converted into heat, noise, and vibration. The existing directions of intensification of the grinding process are as follows: improvement of the design, internal equipment of the cement mill; changes in the physical and chemical properties of the grinding medium; improvement of the grinding scheme. The authors of this article work in the direction of improving the internal equipment, which is reflected in the scientifically based selection of the range of grinding media for the fine grinding chamber, since the rational composition of the grinding load can significantly reduce the energy consumption of the grinding process. The authors continue to study the possibility of using a two-ball loading in a fine grinding chamber. This article provides a brief overview of the different ranges of two-ball grinding loadings, which differ from each other only in the range of grinding media. The possibility of a significant increase in the productivity of the mill when replacing the traditional grinding load with a rational two-ball is shown.

Keywords: clinker, productivity, grinding index, two-ball grinding loading, ball mill, clinker dispersion characteristics.

REFERENCE

1. Pirockij V.Z. Cement mills: technological optimization [Cementnye mel'nicy: tekhnologicheskaya optimizatsiya]. SPb. Publishing house of the Center for Education Informatization 1999, 145 p. (rus).
2. Bogdanov V.S. Ball drum mills [Sharovye barabannye mel'nicy]. Belgorod: Publishing house of the BelGTASM, 2002, 258 p. (rus).
3. Gojsis M. Introduction to grinding technology [Vvedenie v tekhnologiyu pomola]. Bulletin of Cement and its application. 2014. No. 3. Pp. 36–41. (rus).
4. Krytyn G.S., Kuznecov L.N. Mill intensification [Intensifikatsiya raboty mel'nic]. Novosibirsk: VO "Science". Siberian publishing firm. 1993, 240 p. (rus).
5. Potapova E.N., Sulimenko L.M. Influence of the nature of cement raw materials on the processes of structure formation during clinker firing [Vliyanie prirody cementnogo syr'ya na processy strukturoobrazovaniya pri obzhige klinkera]. Bulletin of Cement and its application. 2010. No. 1. Pp. 182–186. (rus).
6. Fedotov P.K. The main reason for the reduction in energy consumption during the destruction of ore in roller presses [Osnovnaya prichina snizheniya energopotrebleniya pri razrushenii rudy v roller-pressah]. Mining information and analytical bulletin. 2013. No. 3. Pp. 309–314. (rus).
7. Edet E. Grinding plant HOROMILL [Pomol'naya ustanovka HOROMILL]. Bulletin of Cement and its application. 2012. No. 1. Pp. 188–192. (rus).
8. Edet E. HOROMILL technology: twenty years of operation around the world [Tekhnologiya HOROMILL: dvadcat' let ekspluatatsii v raznyh stranah mira]. Bulletin of Cement and its application. 2014. No. 1. Pp. 143–146. (rus).
9. Barbanyagre V.D., Stronin A.A. Influence on the granulometric composition of the clinker of the range of grinding media and the grinding intensifier [Vliyanie na granulometricheskij sostav klinkera assortimenta melyushchih tel i intensivatora pomola]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 1. Pp. 71–75. (rus).
10. Stronin A.A., Barbanyagre V.D. Increasing the productivity of an open-loop ball mill using a double-ball charge [Uvelichenie proizvoditel'nosti sharovoj mel'nicy otkrytogo cikla ispol'zovaniem dvuhsharovoj zagruzki]. Materials of the X International Forum with International Participation. (01–15 October 2018). Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhova. 2018. Pp. 1615–1619. (rus).
11. Pat. RU 2397813 C1, Russian Federation IPC B02C 17/22. Classifying lining of a cement mill. V.S. Bogdanov, N.P. Nesmeyanov, D.G. Circular; applicant and patentee State educational institution of higher professional education "Belgorod State Technological University named after VG Shukhov". 2009102796/03; declared 01/28/2009; publ. 27.08.2010.
12. Pat. RU 179532 U1, Russian Federation IPC B02C 17/22. Step lining of a ball drum mill. P.A. Khakhalev, V.S. Bogdanov, Yu.M. Fadin; applicant and patentee State educational institution of higher professional education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov". 2017146870; declared 12.28.2017; publ.

05.17.2018.

13. Cyrkun A.V., Shatohin I.I. Influence of intramill energy exchange devices on improving the operation of cement mills [Influence of intramill energy exchange devices on improving the operation of cement mills]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya molodyh uchenykh BGTU im. V.G. Shuhova. Belgorodskij tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2015. Pp. 1563–1566. (rus)

14. Tishkova I.S., Eremchenko S.M. Intra-mill energy exchange device [Intra-mill energy exchange device]. VII Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum «Education, science, production». Belgorod: BGTU im. V.G. Shuhova, 2015. Pp. 1551–1553. (rus)

15. Pat. RU 2642088 C1, Russian Federation IPC B02C 17/20. Grinding body. G.A. Shchepochkin; applicant and patentee Shchepochkina Yulia Alekseevna. 2017100779; declared 01/10/2017; publ. 24.01.2018.

16. Pat. RU 119645 U1, Russian Federation IPC B02C 17/20. Grinding body. L.Z. Pisarenko, I.A. Busel, N.P. Metelsky, P.I. Busel; applicant and patent holder Closed Joint Stock Company Stroyizyskaniya, Limited Liability Company Izhgeostroy-M 2011122020/13; declared 05/31/2011; publ. 27.08.2012.

17. Hodakov G.S. Fine grinding of building materials [Tonkoe izmel'chenie stroitel'nykh materialov]. Publishing house of literature on construction 1972, 239 p. (rus)

18. Karibaev K.K. Surfactants in the production of binders [Poverhnostno-aktivnye veshchestva v proizvodstve vyazhushchih materialov]. Alma-Ata: "Science". 1980, 336 p. (rus)

19. Kotov S.V., Prohorenko K.L. Use of oil refining waste as intensifiers for cement grinding [Ispol'zovanie othodov neftepererabotki v kachestve intensifikatorov pomola cementa]. Advances in Chemistry and Chemical Technology DI. Mendelev. 2010. Vol. 24. No. 6. Pp. 58–61. (rus)

20. Shahova L.D., Cherkasov R.A. Intensification of the clinker grinding process using a grinding intensifier [Intensifikaciya processa izmel'cheniya klinkera s primeneniem intensifikatora pomola]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 4. Pp. 148–152. (rus)

21. Gluharev N.F. Dry grinding under electrically neutralized conditions [Suhoe izmel'chenie v usloviyah elektronejtralizacii]. SPb. Publishing house of Polytechnic. University, 2014, 192 p. (rus)

22. Sharapov R.R. Closed cycle ball mills: monograph [Sharovye mel'nicy zakrytogo cikla: monografiya]. Belgorod. Publishing house: BSTU im. V.G. Shukhova, 2008, 270 p. (rus)

23. Ivanov A.N., Krot A.Yu., Krot O.P. Reducing the energy intensity of tube mills by pre-grinding [Snizhenie energoemkosti trubnykh mel'nic putem predizmel'cheniya]. National Technical University "Kharkiv Polytechnic University". 2014. No. 7. Pp. 48–54. (rus)

24. Pat 2477659, Russian Federation, IPC B02C 17/20. Ball loading of a drum mill. V.D. Barbanyagra; applicant and patentee State educational institution of higher professional education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov". No. 2010121271/13; declared 05/25/2010; publ. 03.20.2013. (rus)

Information about the authors

Borisov, Ivan N. DSc, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Stronin, Alexandr A. Postgraduate student. E-mail: alexanderstronin@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.04.2021

Для цитирования:

Борисов И.Н., Стронин А.А. Влияние разных ассортиментов двухшаровой мелющей загрузки на производительность шаровой мельницы открытого цикла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 63–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-63-70

For citation:

Borisov I.N., Stronin A.A. Influence of different assortment of two-ball grinding load on the performance of an open-cycle ball mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 63–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-63-70

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81

^{1,*}Онищук В.И., ²Лазарова Ю.С., ¹Евтушенко Е.И.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²АО «НПО Стеклопластик»

*E-mail: v.onishchuk@mail.ru

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ РЕФТИНСКОЙ ГРЭС В ПРОИЗВОДСТВЕ НЕПРЕРЫВНОГО СТЕКЛОВОЛОКНА

Аннотация. В статье приведены результаты оценки исследования возможности применения золошлаковых отходов (зола) Рефтинской ГРЭС в качестве компонента шихты, используемой в производстве непрерывного стекловолокна высокомодульного (тип Е), диэлектрически стойкого (тип S) и высокопрочного, химически устойчивого базальтового (тип Б) составов. Поскольку химический состав золы является многокомпонентным и существенно отличается от составов, традиционно используемых в производстве стекловолокна сырьевых материалов, то для установления технологических особенностей ее применения в качестве компонента шихт, были спроектированы экспериментальные составы стекол, обеспечивающие достижение заданных значений их физико-механических свойств, при максимально возможном содержании в составе стекольных шихт золы. Априорная оценка показала, что приемлемые свойства стекол для стекловолокна составов Е, S и Б могут быть получены при содержании в шихтах 36 %, 68 % и 64 % золы, соответственно, для перечисленных типов стекол. Определение интервалов температур стеклования экспериментальных составов шихт, показало, что увеличение содержания в них золы повышает температуру, обеспечивающую получение качественного расплава. Исследования склонности экспериментальных составов стекол к кристаллизации, препятствующей эффективному процессу волокнообразования, позволило определить, что практически все составы имеют пониженную склонность к кристаллизации, следовательно, могут быть использованы в производстве стекловолокна типов Е, S и Б.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, свойства, моделирование составов стекол, свойства, стеклование и кристаллизация экспериментальных стекол.

Введение. Золошлаковые отходы (ЗШО) – крупнотоннажные не классифицированные, с неопределенными характеристиками отходы производственной деятельности тепловых электростанций (ТЭС) и котельных, образующиеся при сжигании ископаемого топлива для производства электроэнергии и тепла.

Содержание золы при сгорании ископаемого топлива различно и зависит от его вида: от 1 до 45 мас.% в каменных и бурых углях, от 50 до 80 мас.% в горючих сланцах и от 2 до 30 мас.% в топливном торфе.

Важной особенностью ЗШО является то, что наряду с высоким (90 и более мас.%) содержанием в них алюмосиликатов, до 10 мас.% могут быть представлены такими металлами, как барий, титан, марганец, стронций, цирконий, ванадий и др., что объясняется возрастанием их концентрации в 5–6 раз по отношению к исходной в процессе сжигания углей. В золошлаковых отходах могут содержаться и несгоревшие органические частицы топлива, которые могут играть определенную роль при термической обработке отходов в процессе утилизации [1–3].

Поскольку зола и шлак не являются токсичными, и непосредственный контакт с ними не наносит вреда здоровью человека, то эти отходы можно считать вторичными ресурсами сырьевого значения, т.е. их можно рассматривать как

техногенные месторождения полезных ископаемых, в частности в производстве силикатных материалов как недефицитный комплексный вид сырья.

С другой стороны, уже накопленные отвалы ЗШО являются источником повышенной экологической опасности и оказывают косвенное негативное влияние на здоровье человека, подземные и поверхностные воды, атмосферу, растительный и животный мир. ЗШО служат причиной отчуждения земель, которые практически безвозвратно изымаются из полезного пользования [1].

Поэтому грамотная утилизация золошлаковых отходов ТЭС – это комплексная проблема, связанная с решением не только экологических задач (уменьшение площади территорий, отводимых под складирование золошлаков, снижение загрязнения окружающей среды при эксплуатации отвалов, сокращение потребления нерудного минерального сырья, замещаемого золошлаками), но и с эффективностью использования технологических и экономических механизмов, действующих в современных условиях. Поэтому актуальность поиска новых путей утилизации ЗШО очевидна и не вызывает сомнений, поскольку в России почти 70 % всей электроэнергии вырабатывается путем сжигания твердого топлива, в результате чего ежегодно образуется около 50 млн.т. золошлаковых отходов, и при этом уровень их использования не превышает

4 % [4]. На сегодняшний день в России накоплено около 2 млрд т отходов, которые размещаются на территориях более 22 000 га [2, 4, 5]. Такие объемы ЗШО и занимаемые ими территории, позволяют относить их к природным сырьевым материалам, с соответствующим научным и практическим подходом решения путей рационального применения в различных отраслях промышленности.

Методы, оборудование, материалы. Оценка возможности применения ЗШО в качестве компонента шихт для производства различных видов стекловолокна производилась расчетными и экспериментальными методами, традиционно применяемые для решения сходных задач. Так, расчетными методами определялись пределы массовых содержаний ЗШО в шихтах, способных обеспечить не только достижения заданных составов, но и заданных свойств стекол, обеспечивающих их принадлежность к составам стекловолокон типов S, E и Б. Свойства стекол рассчитывались по аддитивному методу А.А. Аппена [6, 7]. Вязкость экспериментальных составов оценивалась расчетным методом по уравнениям Фогеля-Фулчера-Таммана (ФФТ), выведенным на основе химического состава стекла по методу расчета вязкости Охотина [8, 9] и сотрудников всемирно известной компании PPG Industries – Фредериком Валленбергом, Джеймсом Ватсоном и Хонг Ли [10].

Для оценки технологических свойств ЗШО использовались следующие методы: гранулометрический состав золы определялся при помощи автоматизированного лазерного анализатора размеров частиц ANALYSETTE 22, поведение при нагреве изучено методом синхронного термического анализа с помощью STA 449 F1 Jupiter® фирмы NETZSCH, минеральный состав – при помощи дифрактометра общего назначения ДРОН-3. Температуры стеклования экспериментальных шихт для стекол типов S, E и Б определялись методом их ступенчатой термообработки, склонность моделируемых составов к кристаллизации – методом массовой кристаллизации; идентификация продуктов кристаллизации производилась путем обработки дифрактограмм полученных при помощи дифрактометра ДРОН-3.

Для приготовления экспериментальных шихт, наряду с ЗШО использовался кварцевый песок марки ВС-030-В (ГОСТ 22551-2019), доломит марки ДМ-20-0,10 (ГОСТ 23672-2020), мел марки МК1 (ГОСТ 17498-72), сульфат натрия марки ОКП 21-4111-0620 (ГОСТ 21458-75).

Основная часть. Химический состав исследуемых ЗШО Рефтинской ГРЭС, как и других, во многом, определяется зольностью углей, которые используются для генерации теплоносителя.

В рассматриваемом случае Рефтинская ГРЭС использует угли Экибастузского бассейна, характеризующиеся зольностью 30...40 %. Состав и свойства зол определяется количественным соотношением входящих в них минералов, который, в свою очередь, зависит от минералогического состава исходной неозоленной части топлива.

Химический состав ЗШО, использованный для проведения исследований, по данным Рефтинской ГРЭС, следующий, масс. %: 59,06 SiO₂; 1,11 TiO₂; 25,67 Al₂O₃; 6,55 Fe₂O₃; 0,61 MgO; 2,29 CaO; 0,25 Na₂O; 0,60 K₂O; 0,05 SO₃. Как видно из указанных значений, максимум приходится на оксиды SiO₂ и Al₂O₃, которые в сумме составляют около 85 мас. %, что позволяет отнести ЗШО к группе алюмосодержащих сырьевых материалов, таких как полевые шпаты, пегматиты, глины, базальты и др.

Анализ химический составов и свойств стеклянных волокон позволил выделить те из них, которые, обладая высокими значениями механических свойств, могут быть использованы в качестве фибровой арматуры в бетонах самостоятельно или в составе стеклопластиковых армирующих элементов – стержней, пластин и др. Особенностью химических составов стекловолокон является высокое содержание оксида алюминия, что предопределяет высокую долю в шихте ЗШО в случае использования их в качестве базового сырьевого материала.

Для выбранных проектных составов волокон (табл. 1) типа E (диэлектрически стойкий), S (высокомодульный), и Б (базальтовый, высокопрочный и цементостойкий) были рассчитаны шихты с использованием ЗШО и по результатам расчета определены расчетные составы, отличающиеся от проектных из-за наличия в отходах значительного количества оксидов железа.

Расчетные значения физико-механических свойств стекол (табл. 2) проектных и расчетных составов показывают определенные расхождения, связанные с наличием в расчетных составах ЗШО, которые являются причиной изменения соотношения ряда оксидов вследствие повышенного содержания в ЗШО оксида алюминия (Al₂O₃).

Анализ данных, приведенных в табл. 3, наглядно показывает, что в составах S и Б содержание ЗШО является настолько высоким, что они могут рассматриваться, как базовый сырьевой материал, содержание которого в шихтах составляет 67,4 и 64,2 мас. %, соответственно. Также особенностью экспериментальных составов E и S является повышенное значение «угара» шихт.

Расчетные химические составы стекол использовались для расчета рецептур шихт (табл. 3)

и оценки содержания сырьевых компонентов в них.

Таблица 1

**Базовые, проектные и расчетные химические составы стекол
для получения непрерывного стекловолокна**

Тип стекловолокна	Содержание оксидов, масс. %								
	SiO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ
Е	59,0–60,0	0,5–1,5	12–13	0,2	3,0–4,0	22,0–23,0	0,6–0,9	0–0,2	–
- проектный	59,0	–	12,0	–	4,0	23,0	2,0	–	100
- расчетный	57,0	0,5	11,6	2,9	3,9	22,2	1,9	–	100
С	60,0–65,5	0–1	23,0–35,0	0,01	6,0–11,0	0–9,0	0–0,1	–	–
- проектный	62,0	–	25,0	–	6,0	–	7,0	–	100
- расчетный	52,5	1	21,2	5,3	5,0	9,1	5,9	–	100
Б	47,5–55,0	0,3–2,0(TiO ₂)	14,0–20,0	7,0–13,5	3,0–8,5	7,0–11,0	2,5–7,5	2,5–7,5	–
- проектный	52,8	–	18,0	–	3,7	8,5	3,5	–	86,5
- расчетный	57,4	1,0	19,5	4,9	4,0	9,3	3,9	–	100

Таблица 2

Свойства экспериментальных составов стекол для стекловолокна типов С, Е и Б

Тип стекловолокна	Показатели свойств					
	ρ, кг/м ³	Е, ГПа	G, ГПа	α·10 ⁷ , К ⁻¹	σ, Н/м	n _D
Е, проект	2615,5	81,7	34,7	54,1	–	–
Е, расчет	2659,5	80,1	34,5	63,6	0,387	1,517
С, проект	2501,7	80,02	33,7	45,5	–	–
С, расчет	2569,6	76,1	33,0	48	0,368	1,462
Б, проект	2501,5	78,2	32,8	55,1	–	–
Б, расчет	2579,5	75,53	32,46	55,2	0,367	1,4616

Таблица 3

Характеристика экспериментальных шихт для стекловолокна типов С, Е и Б

Шихта	Зола	Песок	Доломит	Мел	Сульфат	Σ	«Выход» стекла	«Угар» шихты
Е	45,483	31,108	18,378	29,892	3,94	128,8	77,6	22,4
	35,4	24,1	14,2	23,2	3,1	100%		
С	96,378	4,56	27,334	–	14,72	142,99	69,9	30,1
	67,4	3,2	19,1	–	10,3	100%		
Б	69,38	11,469	16,503	3,300	7,04	107,7	92,8	7,2
	64,2	10,6	15,3	3,1	6,5	100%		

Из ряда показателей качества сырьевых материалов, гранулометрический состав во многом определяет их технологичность и экологическую составляющую, поскольку значительное содержание в ЗШО тугоплавких оксидов будет определять скорость трансформации шихты в стеклообразное состояние. Так в традиционных стекольных шихтах скорость процессов стеклообразования лимитируется размером зерен кварцевого песка, в рассматриваемом случае – размерами частиц ЗШО, содержащих значительные количества оксидов кремния и алюминия. Экологическая составляющая связана с наличием в сырьевых материалах определенного содержания пылевидной фракции – частиц с размером менее 10

мкм, что определяет категорию пыли от крупно- до средне- и мелкодисперсной.

Исследование интегрального и дифференциального распределения размеров частиц ЗШО (рис. 1) показало, что материал является полидисперсным, с преимущественным содержанием частиц от 0,1 мкм до 50 мкм с максимумом 20 мкм – 1-ый диапазон и от 50 мкм до 200 мкм с максимумом 100 мкм – 2-ой диапазон, а содержание пылевидной фракции с размерами частиц <10 мкм составляет не более 25 %, что потребует при разгрузке и транспортировании ЗШО использовать герметизацию транспортирующего технологического оборудования и систем аспирации, которые в настоящее время широко используются в

производстве стекла и других силикатных материалов. Удельная поверхность ЗШО составляет

467 м²/кг, а объемная плотность находится в диапазоне пределах 0,760–0,820 кг/м³.

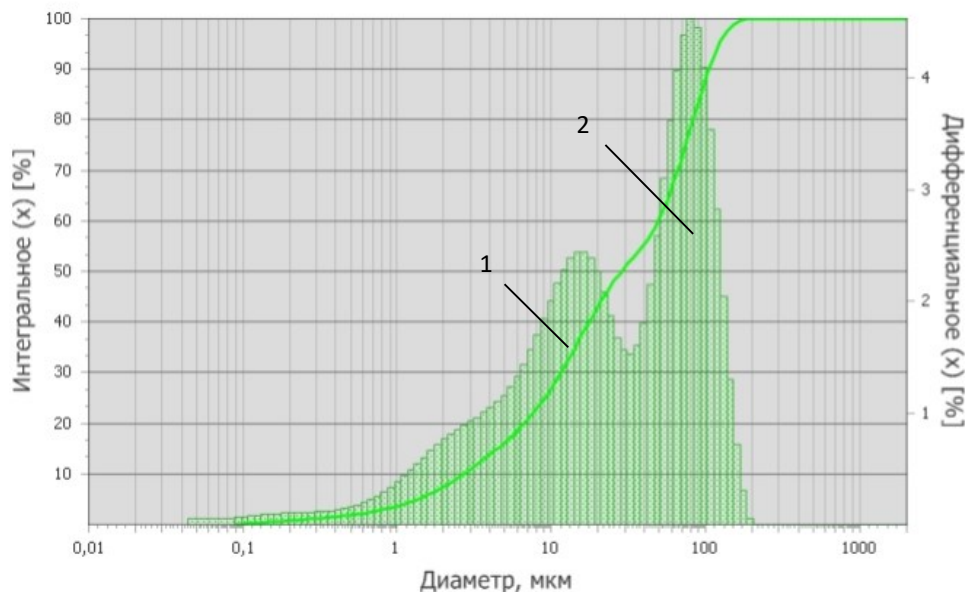


Рис. 1. Интегральное (1) и дифференциальное (2) распределение размеров частиц ЗШО Рефтинской ГРЭС

Согласно результатам синхронного термического анализа (рис. 2), ЗШО Рефтинской ГРЭС можно назвать инертным материалом, поскольку при полном выгорании углерода они представляют собой несгорающий остаток, поскольку все

возможные фазовые превращения и реакции были реализованы ранее в процессе теплогенерации при сжигании углей.

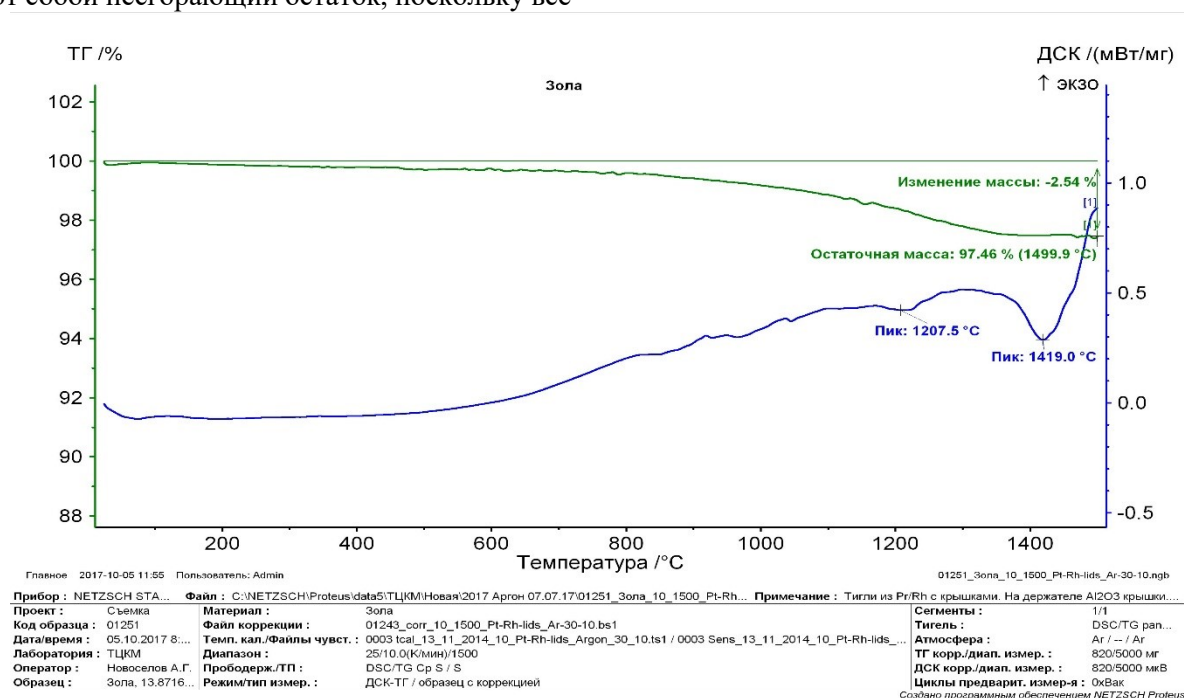


Рис. 2. Термический анализ ЗШО Рефтинской ГРЭС

Потери массы ЗШО в интервале температур от 20 до 1400 °C составили 2,54 %. Эндотермические эффекты в интервалах температур 1180...1220° и 1380...1450° с максимумами, со-

ответственно 1207 °C и 1419°, по нашему мнению, связаны с образованием и плавлением тугоплавкой стеклофазы на основе силиката кальция.

По результатам РФА (рис. 3) в ЗШО обнаружен муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и кварц (SiO_2).

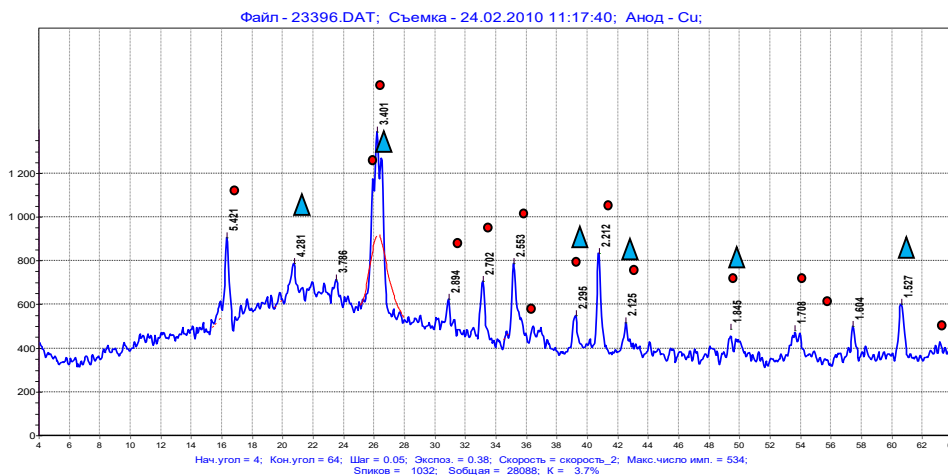


Рис. 3. Дифрактограмма ЗШО Рефтинской ГРЭС:

● – муллит, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; ▲ – кварц, SiO_2

В связи с тем, что температура плавления кварца составляет 1710°C , а муллита 1810 – 1820°C , предполагать, что эндотермический эффект при 1419°C (рис. 2) может быть объясним их плавлением нельзя, следовательно предположение о принадлежности этого эндотермического эффекта к переходу в жидкую фазу образовавшегося силиката кальция (CaSiO_3) является наиболее вероятным.

Одной из важнейших характеристик стекол, определяющей их пригодность к производству различных видов стеклоизделий, является температурная зависимость вязкости.

$$\begin{aligned}\eta_{1450} &= 0,677x_1 - 4,615x_2 + 2,802x_3 + 0,76x_4 - 1,161x_5 - 0,868x_6 + 0,241x_7 - 7,03x_8 \\ \eta_{1400} &= 1,165x_1 - 5,34x_2 + 5,36x_3 + 0,056x_4 - 2,565x_5 - 1,586x_6 - 0,488x_7 - 10,45x_8 \\ \eta_{1350} &= 2,002x_1 - 13,189x_2 + 8,79x_3 + 0,151x_4 - 3,48x_5 - 2,15x_6 - 0,63x_7 - 19,74x_8 \\ \eta_{1300} &= 4,14x_1 - 29,01x_2 + 12,608x_3 + 0,54x_4 - 4,58x_5 - 3,655x_6 + 1,236x_7 - 42,27x_8 \\ \eta_{1250} &= 5,35x_1 - 12,176x_2 + 16,46x_3 + 2,45x_4 - 10,02x_5 + 6,008x_6 + 10,33x_7 - 75,82x_8,\end{aligned}$$

где: η – вязкость, Пз ($10 \text{ Пз} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$); x_1 – содержание SiO_2 , мас. %; x_2 – TiO_2 ; x_3 – Al_2O_3 ; x_4 – Fe_2O_3 ; x_5 – FeO ; x_6 – MgO ; x_7 – CaO ; x_8 – Na_2O .

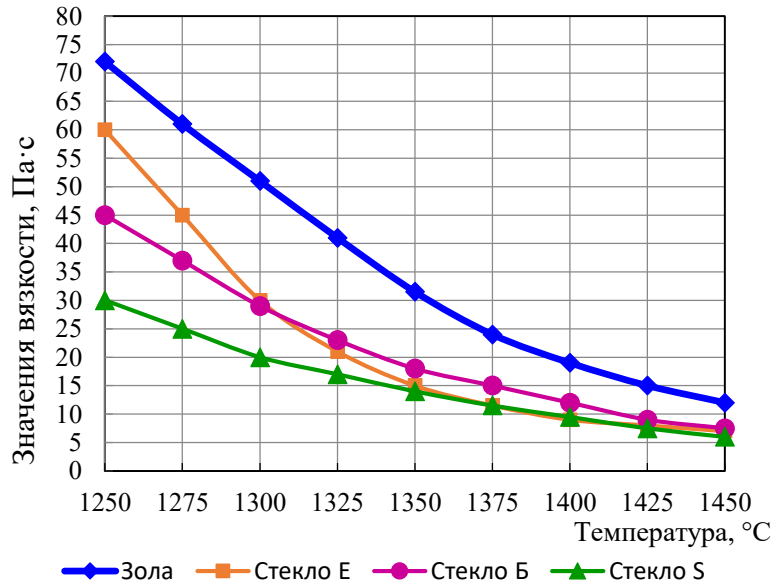


Рис. 4. Температурная зависимость вязкости золы и составов Е, С и Б

Расчетные температурные зависимости вязкости (рис. 4) ЗШО и экспериментальных стекол показывают, что расплавы проектных составов Е, S и Б будут относиться к группе вязких и поэтому пригодны для получения стекловолокон.

Для визуального анализа поведения экспериментальных шихт в процессе нагрева, термообработке в интервале температур 1000...1500 °С, подвергались специально отформованные брикеты шихт. Термообработка шихт при 1500 °С проводилась в корундовых тиглях вместимостью 30 мл. Нагрев экспериментальных шихт производился со скоростью 200 °С/ч, выдержка при максимальной температуре составляла 1 ч, после чего для фиксации их состояния они быстро извлекались из рабочей камеры печи и охлаждались при комнатной температуре.

В результате термообработки были построены 3-х компонентные диаграммы плавкости экспериментальных составов шихт (табл. 4), полученных путем суммирования содержания в шихтах тугоплавких сырьевых материалов – песка и золошлаковых отходов (П+ЗШО), карбонатных

материалов – доломита и мела (Д+М), где третьим компонентом является сульфат натрия (С) – щелочесодержащее сырье, эффективный ускоритель варки и осветлитель стекломассы.

Таблица 4

Данные для построения диаграмм плавкости

Тип стекла	П + ЗШО	Д+М	С
Е	59,5	37,5	3
S	70,6	19,1	10,3
Б	75,1	18,4	6,5

После построения диаграмм плавкости экспериментальных шихт (рис. 5–9), было установлено, что после термообработки при 1000 °С брикеты Е, S и Б не изменили своей конфигурации (рис. 5), произошло твердофазное спекание – спекание без образования жидкой фазы. Такое спекание, как правило, происходит в несколько этапов: возникновение и развитие связей между частицами, образование и рост контактов, закрытие сквозной пористости, укрупнение и сфероидизация пор, уплотнение за счет усадки [12].

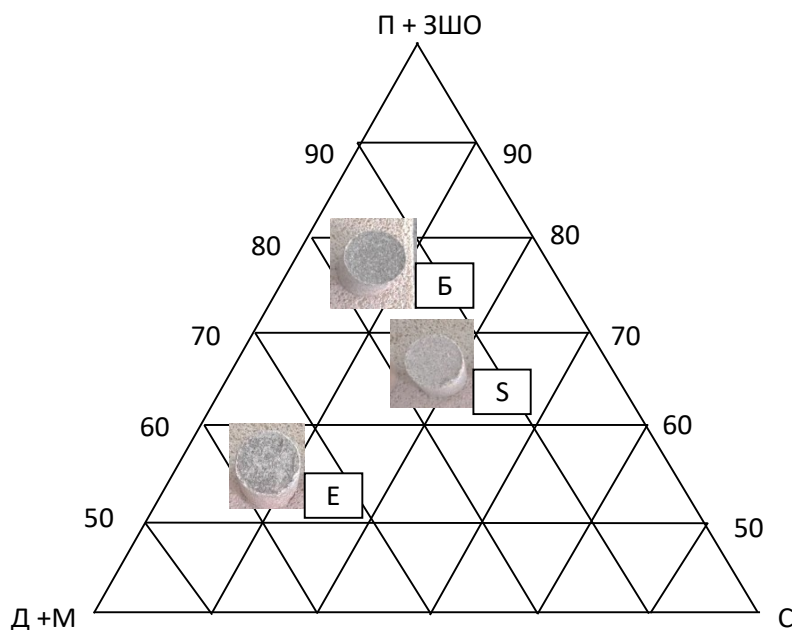


Рис. 5. Диаграмма плавкости шихт, термообработанных при 1000 °С

Подобное состояние брикетов отмечалось и после термообработки при температуре 1100 °С, что объясняется повышенным содержанием в составе экспериментальных шихт тугоплавких стеклообразующих ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) оксидов и пониженным содержанием легкоплавкого оксидомодификатора (Na_2O) в сравнении с традиционными составами массово используемых в стекольной промышленности натрийкальцийсиликатных стекол.

Определенное изменение размеров и структуры брикетов отмечается уже при 1200 °С (рис. 6). Так состав стекла типа Е расплавился больше, нежели брикеты составов S и Б, что говорит об

относительно большей легкоплавкости состава этого типа в сравнении с другими.

При повышении температуры до 1300 °С, брикеты экспериментальных шихт расплавились в большей степени, что сопровождалось накоплением достаточного количества микроучастков расплава, обеспечивающего переход шихт в область пластической деформации (рис. 7), позволяющей протекать процессам удаления из образовавшейся стекломассы продуктов диссоциации карбонатов и сульфата натрия, а также физически вовлеченного с сырьевыми материалами воздуха.

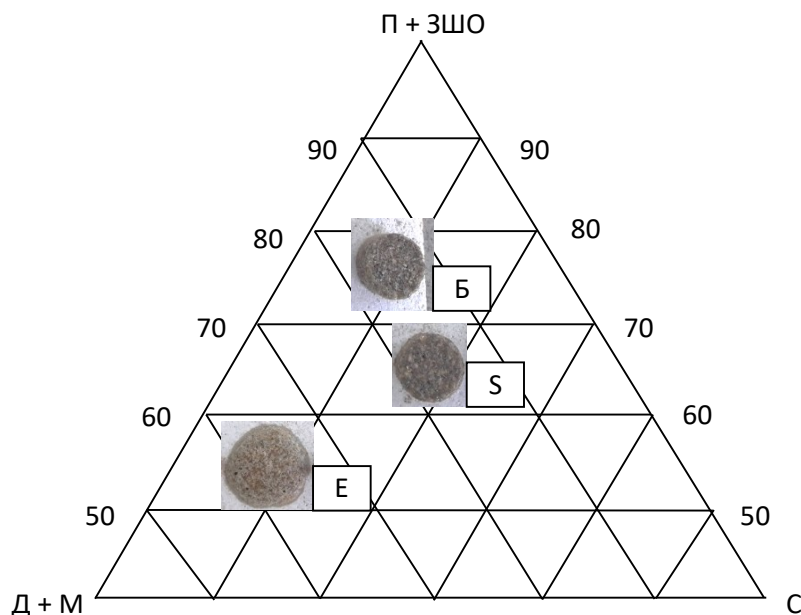


Рис. 6. Диаграмма плавкости шихт, термообработанных при 1200 °C

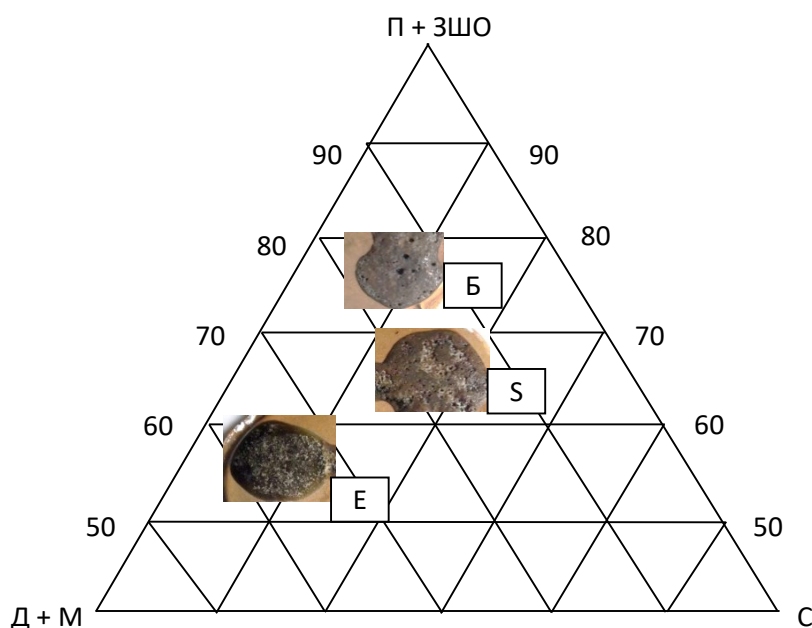


Рис. 7. Диаграмма плавкости шихт, термообработанных при 1300 °C

Как можно было предположить из температурной зависимости вязкости (рис. 4), температура варки экспериментальных стекол, соответствующая вязкости < 10 Па·с, составит порядка 1500 °C. На диаграмме плавкости шихт, термообработанных при 1500 °C (рис. 8) видно, что на поверхности стекломассы в тиглях с составами S и Б осталась варочная пена. Это может быть связано с высоким содержанием в шихте сульфатов и сульфидной серы, являющихся причинной протекания окислительно-восстановительных процессов с выделением газов при разложении сульфата натрия.

Как известно [13, 14], сульфат натрия подразделяют на три типа, и, в зависимости от содержания, он может присутствовать в стекле в трех типах. Тип А – растворяющийся в расплаве стекла во время плавления шихты и остающийся в не разложенном состоянии до конца варки (< 2 мас. % от Σ щелочей). Тип В – растворяющийся в расплаве стекла в перенасыщенном состоянии (3...4 мас. % от Σ щелочей, но при повышении температуры разлагающийся в интервале 1350...1400 °C).

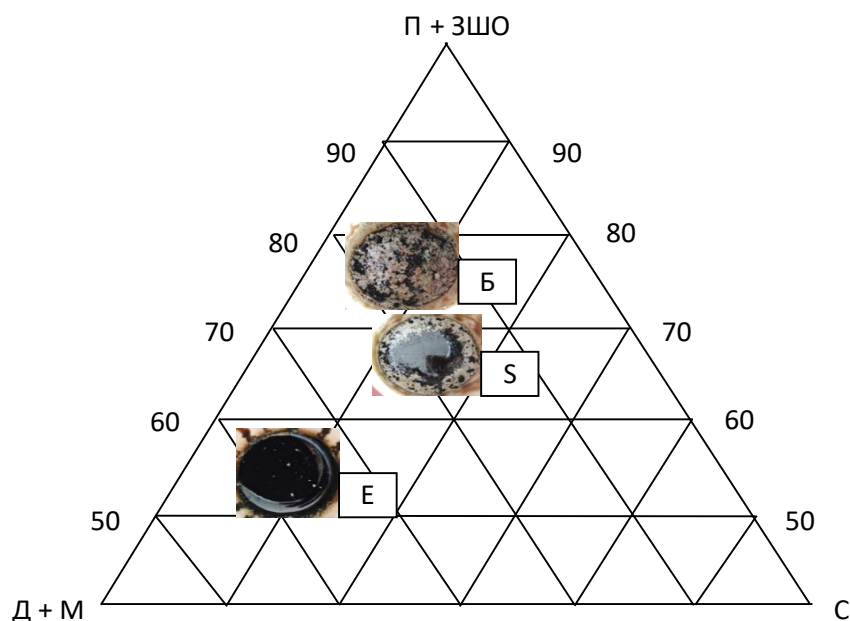


Рис. 7. Диаграмма плавкости шихт, термообработанных при 1500 °С

При разложении сульфат реагирует с кварцевым песком с образованием метасиликата натрия с выделением диоксида серы и кислорода. Эффект «механического перемешивания» ускоряет растворение кварцевых зерен, а газообразный диоксид серы – повышает скорость «осветления». Тип С – не растворяющийся в расплаве стекла и проявляющиеся в виде «щелоков» на поверхности расплава стекла (более 6 мас.% от Σ щелочей). При установившемся равновесии А+В, остаток выделяется в виде «щелоков» на поверхности стекломассы. Для освобождения от них зеркала стекломассы используют восстановители: 5...6 % от массы сульфата – уголь, сульфатно-угольные смеси, растворы сульфата в эмульсиях мазута и др. Поскольку в состав экспериментальных шихт восстановители не вводили, а содержание сульфата в шихтах составляет (табл. 3) мас. %: 3,1 (тип Е); 6,5 (тип Б) и 10,3 (тип Б), представленные данные о роли сульфата в стекле полностью согласуются с полученными данными в диаграмме плавкости шихт, термообработанных при 1500 °С.

Цвет всех составов стекол зелено-коричневый (темно-оливковый), так как носителем железа являются ЗШО. Интенсивность окраски пропорциональна содержанию ЗШО в шихте и увеличивается в ряду $E < B < S$.

Лучше всего проварился состав Е, содержащий наименьшее количество тугоплавких компонентов шихты, поверхность стекломассы чистая, без спеков и пены. В объеме практически отсутствуют газовые включения, стекломасса хорошо осветлена.

Далее по степени качества провара следует состав S; на поверхности наблюдаются пузырьки

воздуха, а по периметру частично вспененные участки с остеклованной поверхностью или участки спеков.

Наиболее трудно проваривался состав Б. Поверхность стекломассы покрыта плотной пленкой пены, содержащей не растворившиеся частицы кварцевого песка.

Выводы

1. Установлены физико-механические свойства ЗШО, позволяющие говорить о технологической пригодности этого вида материала в технологии традиционных стекольных шихт без дополнительной их обработки.

2. Изучен минералогический состав и поведение ЗШО при нагреве, определены температурные зависимости вязкости экспериментальных составов, что подтверждает рациональность их применения в производстве стекла типов Е, S и Б.

3. Построенные диаграммы плавкости дают основные представления о стекловании экспериментальных шихт и выявляют некоторые особенности, которые необходимо учитывать при развитии исследований в данном направлении.

4. В целом, доказана возможность использования ЗШО Рефтинской ГРЭС в качестве основного сырьевого материала при производстве непрерывного волокна типов S и Б, содержание в составах которых ЗШО соответственно составляет 67,4 и 64,2 мас. %. В стекле типа Е содержание ЗШО составляет 35,4 мас. %, что также позволяет говорить о значительной экономии кварцсодержащего и алюминийсодержащего сырья в производстве этого типа стекла и расширяет представления о сырьевой базе для производства различных типов стекловолокна.

5. Полученные в результате исследования данные могут оперативно реплицироваться в отношении применения ЗШО других 80 ГРЭС России, основным источником топлива на которых являются ископаемые угли различных месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архангельский И.В. Золошлаковые отходы ТЭС и котельных. Инженерные изыскания. Утилизация. GEOinfo.ru. Информационный ресурс для инженеров-изыскателей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geoinfo.ru/products-pdf/zoloshlakovyie-othody-tehs-i-kotelnyh-inzhenernye-izyskaniya-utilizaciya.pdf>. (дата обращения 14.02.2020)
2. Шамрай Е.И., Таскин А.В., Иванников С.И., Юдакова А.А. Исследование возможностей комплексной переработки отходов предприятий энергетики Приморского края // Современные наукоемкие технологии. 2017. №3. С.68–75.
3. Калачев А. Рынок золошлаковых материалов России: проблемы и решения [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/30342910-Rynok-zoloshlakovyh-materialov-rossii-problemy-i-resheniya.html> (дата обращения 12.03.2021).
4. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии. 2019. № 4. С. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077.
5. Зырянов В.В., Зырянов Д.В. Зола-уноса – техногенное сырье. М.: ИИЦ «Маска», 2009. 319 с.
6. Химия стекла. Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1970. 351 с.
7. Матвеев М.А., Матвеев Г.М., Френкель Б.Н. Расчеты по химии и технологии стекла: Справочное пособие. Москва, 1972. 233с.
8. Мазурин О.В., Николина Г.П., Петровская М.Л. Расчет вязкости стекол. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1988. 46 с.
9. Жерновой Ф.Е., Красильникова Е.А. Закаленные механически матированные стекла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №6. С. 177–181.
10. Wallenberger F.T., Watson J.C., Li, Hong. Glass fibers. ASM Handbook. 2000. 21. Pp. 27–34. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21.a0003353>
11. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N., Uglova, T.K. Dependence of the viscosity of basalt melts on the chemical composition of the initial mineral material // Glass Ceram. 2012. 68. Pp. 323–326 <https://doi.org/10.1007/s10717-012-9381-9>
12. Будников П.П., Балкевич В.Л., Булавин И.А., Полубояринов Д.Н., Бережной А.С., Куколев Г.В., Попильский Р.Я. Химическая технология керамики и огнеупоров. Изд-во литературы по строительству, М.:1972. 553 с.
13. Min'ko N. I. Binaliev I. M. Role of sodium sulfate in glass technology // Glass Ceram. 2013. 69. Pp. 361–365. <https://doi.org/10.1007/s10717-013-9479-8>
14. Zhernovaya N.F., Min'ko N.I., Onishchuk V.I., Kochetov M.Yu., Borodkin S. A. Effectiveness of sulfate clarification of type E alkali-free glass // Glass Ceram. 2008. 65. 109–112. <https://doi.org/10.1007/s10717-008-9027-0>

Информация об авторах

Онищук Виктор Иванович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология стекла и керамики». E-mail: v.onishchuk@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лазарова Юлия Сергеевна, младший научный сотрудник. E-mail: juliaitsmee@mail.ru. АО «НПО Стеклопластик». Россия, 141551, Московская обл., городской округ Солнечногорск, р.п. Андреевка, стр.3-А.

Евтушенко Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология стекла и керамики». E-mail: aukaei@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.04.2021 г.

© Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И., 2021

^{1,*}Onishchuk V.I., ²Lazarova Yu.S., ¹Evtushenko E.I.
¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
²JSC "SPA Stekloplastik"
 *E-mail: v.onishchuk@mail.ru

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING ASH FROM REFTINSKAYA GRES THE PRODUCTION OF CONTINUOUS GLASS FIBER

Abstract. The article presents the results of the evaluation of the study of the possibility of using ash and slag waste (ASW) of the Reftinskaya SDPP as a component of the charge used in the production of continuous glass fiber of high-modulus (type E), dielectric resistant (type S) and high-strength, chemically stable basalt (type B) compositions. Since the chemical composition of ash is multicomponent and significantly differs from the compositions traditionally used in the production of glass fiber raw materials, in order to establish the technological features of its use as a component of the charge, experimental compositions of glasses are designed to achieve their specified physical and mechanical properties, with the maximum possible content of ash in the composition of glass charges. The predefined assessment shows the acceptable properties of glass for glass fiber compositions E, S and B can be obtained at the content of 36 %, 68 % and 64 % ash in the charges, respectively, for the listed types E, S u B. The determination of the glass transition temperature intervals of the experimental charge compositions demonstrates that an increase in the ash content in them increases the temperature that ensures the production of a high-quality melt. Studies of the tendency of experimental glass compositions to crystallization, which prevents the effective process of fiber formation, allows to determine that almost all compositions have a reduced tendency to crystallization, therefore, they can be used in the production of glass fibers of types E, S and B.

Keywords: ash and slag waste, properties, modeling of glass compositions, properties, glass transition and crystallization of experimental glasses.

REFERENCES

1. Arkhangelsky I.V. Ash and slag waste from thermal power plants and boiler houses. Engineering survey. Disposal. GEOinfo.ru. Information resource for survey engineers [Zoloshlakovyeh othody TES i kotel'nyh. Inzhenernye izyskaniya. Utilizatsiya. GEOinfo.ru. Informatsionnyj resurs dlya inzhenerov-izyskatelej]. Access mode: <https://www.geoinfo.ru/products-pdf/zoloshlakovyeh-othody-tehs-i-kotelnyh-inzhenernye-izyskaniya-utilizatsiya.pdf>. (date of the application: 02/14/2020) (rus)
2. Shamray E.I., Taskin A.V., Ivannikov S.I., Yudakova A.A. Investigation of the possibilities of integrated processing of waste from power engineering enterprises of the Primorsky Territory [Issledovanie vozmozhnostej kompleksnoj pererabotki othodov predpriyatij energetiki Primorskogo kraja]. Modern science-intensive technologies. 2017. No. Pp. 68–75. (rus)
3. Kalachev A. Market of ash and slag materials in Russia: problems and solutions [Rynok zoloshlakovyeh materialov Rossii: problemy i resheniya]. URL: <https://docplayer.ru/30342910-Rynok-zoloshlakovyeh-materialov-rossii-problemy-i-resheniya.html> (date of the application: 03/12/2021). (rus)
4. Pichugin E.A. Analytical review of the experience accumulated in the Russian Federation of involving ash and slag waste from thermal power plants in the economic turnover [Analiticheskij obzor nakoplennoho v Rossijskoj federacii opyta vovlecheniya v hozyajstvennyj oborot zoloshlakovyeh othodov teplo-elektrostantsij]. Problems of regional ecology. 2019. No. Pp. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077. (rus)
5. Zyryanov V.V., Zyryanov D.V. Fly ash is a technogenic raw material [Zola-unosa – tekhnogenoe syr'e], M.: IITs "Mask", 2009. 319 p. (rus)
6. Glass chemistry [Himiya stekla]. Leningrad: Chemistry. Leningr. Department, 1970. 351 p. (rus)
7. Matveev M.A., Matveev G.M., Frenkel B.N. Calculations in the chemistry and technology of glass: A reference guide. Moscow, 1972. 233 p. (rus)
8. Mazurin O.V., Nikolina G.P., Petrovskaya M.L. Calculation of glass viscosity [Raschet vyazkosti stekol]. L.: LTI them. Lensoвета, 1988. 46 p. (rus)
9. Mill F.E., Krasilnikova E.A. Tempered mechanically frosted glass [Zakalennyye mekhanicheski matirovannyye stekla]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 6. Pp. 177–181. (rus)
10. Wallenberger F.T., Watson J.C., Li, Hong. Glass fibers. ASM Handbook. 2000. 21. Pp. 27–34. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21.a0003353>
11. Tatarintseva O.S., Khodakova N.N., Uglova, T.K. Dependence of the viscosity of basalt melts on the chemical composition of the initial mineral material. Glass Ceram. 2012. 68. Pp. 323–326 <https://doi.org/10.1007/s10717-012-9381-9>

12. Budnikov P.P., Balkevich V.L., Bulavin I.A., Poluboyarinov D.N., Berezhnoy A.S., Kukolev G.V., Popilsky R.Ya. Chemical technology of ceramics and refractories [Himicheskaya tekhnologiya keramiki i огнеупоров]. Publishing house of literature on construction, Moscow 1972. 553 p. (rus)

13. Min'ko N. I. Binaliev I. M. Role of sodium sulfate in glass technology. Glass Ceram. 2013. 69.

Pp. 361–365. <https://doi.org/10.1007/s10717-013-9479-8>

14. Zhernovaya N.F., Min'ko N.I., Onishchuk V.I., Kochetov M.Yu., Borodkin S. A. Effectiveness of sulfate clarification of type E alkali-free glass. Glass Ceram. 2008. 65. 109–112. <https://doi.org/10.1007/s10717-008-9027-0>

Information about the authors

Onishchuk, Viktor I. PhD, Professor. E-mail: v.onishchuk@mail.ru Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Lazarova, Yulia S. Junior researcher. E-mail: juliaitsmee@mail.ru JSC "SPA Stekloplastik". Rossiya, 141551, Moscow region, Solnechnogorsk city district, Andreevka village, p. 3-A

Yevtushenko, Yevgeny I. DSc, Professor. E-mail: naukaei@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 09.04.2021

Для цитирования:

Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. Оценка возможности использования золы рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81

For citation:

Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Evtushenko E.I. Assessment of the possibility of using ash from reftinskaya gres the production of continuous glass fiber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-82-86

Дмитриенко В.Г., Воронов В.П., Шеметов Е.Г., *Шеметова О.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: olga95kizilova@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА НА ВЫХОДЕ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РАЗГОННОЙ ТРУБКИ СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ПЛОСКОЙ ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРОЙ ТОРООБРАЗНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. В настоящее время в промышленности строительных материалов и других отраслей промышленности возрос спрос на использование порошков высокой дисперсности. Для их производства используются струйные мельницы, поэтому разработка новых конструкций мельницы, повышение эффективности помола, снижение удельных энергозатрат при помоле являются актуальной задачей. В данной статье дается математическое описание движения двухфазного потока на выходе из разгонной трубки струйной мельницы с плоской помольной камерой торообразной формы. Высота разгонной трубки от отбойной плиты играет важную роль в процессе помола материала, так как на этом участке, в камере помола, происходит первичное измельчение частиц, от которого зависит размер частиц, которые будут доизмельчаться на периферии камеры помола. В результате теоретических расчетов получена формула, которая позволяет определить высоту разгонной трубки от отбойного элемента при заданных скоростных параметрах двухфазного потока. А также в статье был построен график зависимости изменения скорости движения частицы от текущей координаты высоты разгонной трубки, который показал, что размер частиц существенно влияет на характер их движения в помольной камере. Используя формулу можно определить расстояние эффективного пролета частиц в зависимости от их размера, из условия достижения максимальной их скорости.

Ключевые слова: Струйная мельница, камера помола, разгонная трубка, частица, двухфазный поток.

Введение. Известно, что для получения сверхтонких порошков используют мельницы струйной энергии с различным исполнением камер помола. [1–7] С целью увеличения эффективности помола материалов с различной плотностью в БГТУ им. В.Г. Шухова идет постоянный поиск новых технических решений помольных камер струйных мельниц. Так авторами [8] предложена конструкция плоской помольной камеры торообразной формы для получения пигмента, фармацевтических препаратов и порошков для сухих строительных смесей. [9–12]. Для расчета технологических и конструктивных параметров необходимо понимание аэродинамических процессов, происходящих в камере помола и харак-

тера движения двухфазного потока, вылета частиц из разгонной трубки, их взаимодействие с отбойным элементом и боковыми стенками камеры [13–15].

Основная часть. Рассмотрим теоретическое исследование движения двухфазного потока на выходе из разгонной трубки струйной мельницы с плоской помольной камерой торообразной формы.

Рассмотрим движение частицы материала «истекающего» с начальной скоростью U_0 из разгонной трубки вертикального исполнения потоком газа (воздухом) с начальной скоростью U_0 (рис. 1).

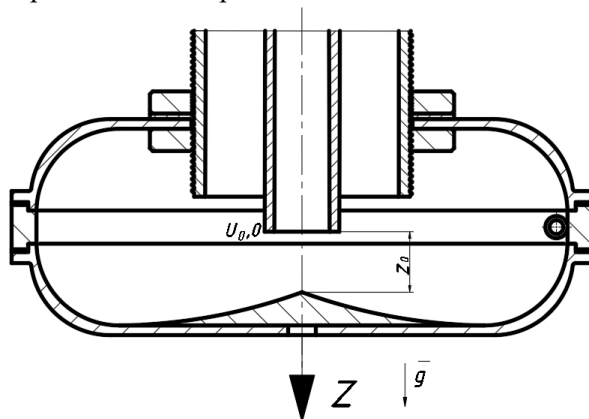


Рис. 1. Расчетная схема, для определения скорости газа (воздуха)

Изменение скорости частицы материала в двухфазном потоке можно описать в рамках уравнения, основанного на втором законе Ньютона:

$$m \frac{d\vartheta(z)}{dt} = P + f, \quad (1)$$

где, m – масса частицы материала; z – текущая координата, отсчитываемая от среза разгонной трубки; f – сила межфазного взаимодействия; P – сила тяжести частицы материала (Н).

Сила тяжести частицы определяется вторым законом Ньютона по формуле:

$$P = mg. \quad (2)$$

Учитывая форму частицы, значение ее массы связано с плотностью частицы соотношением:

$$m = \psi d^3 \rho, \quad (3)$$

где, ψ – коэффициент учитывающий форму частицы (для кубовидной формы частицы $\psi = 1$, для частицы сферической формы $\psi = \frac{\pi}{6}$).

Силу межфазного взаимодействия « f » запишем в следующем виде:

$$\frac{d\vartheta(z)}{dt} = g + \frac{4\pi\rho_0 v}{\psi \cdot d^2 \cdot \rho} (U(z) - \vartheta(z)) + \frac{\pi\rho_0 v^{\frac{1}{3}}}{2\psi \cdot \rho \cdot d^{\frac{5}{3}}} (U(z) - \vartheta(z))^{\frac{5}{3}}. \quad (7)$$

В левой части уравнения (7) перейдем от дифференцирования по времени к дифференцированию по координате согласно соотношению:

$$\frac{d\vartheta(z)}{dt} = \frac{d\vartheta(z)}{dz} \cdot \frac{dz}{dt}, \quad (8)$$

и учитывая, что

$$\frac{dz}{dt} = \vartheta(z), \quad (9)$$

уравнение (7) принимает вид:

$$\vartheta(z) \frac{d\vartheta(z)}{dz} = A + B(U(z) - \vartheta(z)) + C(U(z) - \vartheta(z))^{\frac{5}{3}}, \quad (10)$$

В уравнение (10) введены следующие обозначения:

$$A = g, \quad (11)$$

$$B = \frac{4\pi\rho_0 v}{\psi \cdot d^2 \cdot \rho}, \quad (12)$$

$$C = \frac{\pi\rho_0 v^{\frac{1}{3}}}{2\psi \cdot \rho \cdot d^{\frac{5}{3}}}. \quad (13)$$

Будем предполагать, что изменение скорости газа (воздуха) после выхода из разгонной трубки носит линейный характер:

$$\vartheta(z) \frac{d\vartheta(z)}{dz} = A + B(U_0(1 - \frac{z}{z_0}) - \vartheta(z)) + C(U_0(1 - \frac{z}{z_0}) - \vartheta(z))^{\frac{5}{3}}. \quad (21)$$

Полученное уравнение (21) может быть использовано для определения изменения скорости частиц, измельчаемого материала в помольной камере, на участке от среза разгонной трубки вертикального исполнения до отбойной плиты.

Интегрирование полученной формулы производили в программном продукте Maple путем применения численных методов. Результаты чис-

$$f = f_0 \cdot \frac{\rho_0 S}{2} (U(z) - \vartheta(z))^2, \quad (4)$$

где, f_0 – коэффициент лобового сопротивления частицы; ρ_0 – плотность газа (воздуха), кг/м³; S – площадь поперечного сечения частицы материала, м²; $U(z)$ – изменение скорости газа (воздуха) в направлении оси «OZ»; $\vartheta(z)$ – изменение скорости частицы в направлении оси «OZ».

Коэффициент лобового сопротивления в соотношении (4) зависит от режима движения, который в свою очередь определяется числом Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{(U(z) - \vartheta(z)) \cdot d}{\nu}, \quad (5)$$

где, d – диаметр частицы; ν – кинематическая вязкость газа (воздуха).

В теоретических расчетах будем использовать зависимость коэффициента лобового сопротивления в виде формулы Клячко [15]:

$$f_0 = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (6)$$

Подстановка соотношений (2) – (6) в уравнение (1) приводит к следующему результату:

$$U(z) = a \cdot z + b. \quad (14)$$

Согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 1, определяем неизвестные параметры a и b :

$$\text{при } z = z_0 \quad U(z) = 0; \quad (15)$$

$$\text{при } z = 0 \quad U(0) = U_0; \quad (16)$$

Применив (15) к (14) получаем:

$$0 = a \cdot z_0 + b, \quad (17)$$

аналогично применив (16) к (14) имеем:

$$U_0 = b. \quad (18)$$

Подставив U_0 вместо b из (18) в выражение (17) определим неизвестный параметр:

$$a = -\frac{U_0}{z_0}. \quad (19)$$

Подставив в выражения (18) и (19) в выражение (14) получим следующее выражение:

$$U(z) = U_0(1 - \frac{z}{z_0}). \quad (20)$$

С учетом выражение (20), уравнение (10) примет окончательный вид:

ленного интегрирования формулы (21) для размеров частиц от 0,5 до 4 мм представлены как графические зависимости изменения скорости частиц измельчаемого материала от среза разгонной трубки до встречи с отбойной плитой (рис. 2).

Результаты интегрирования указывают на то, что размер частиц существенно влияет на характер их движения в помольной камере.

Практически все частицы, независимо от их размеров на начальном участке помольной камеры продолжают разгоняться энергоносителем до того момента пока скорость энергоносителя

выше скорости самих частиц. Так частицы диаметром $d_{\text{ч}}=2\div4$ мм достигают максимальной своей скорости на расстоянии от 10 до 16 мм от среза разгонной трубки, а частицы $d_{\text{ч}}=0,5\div1$ на расстояние от 16 до 20 мм (рис. 2).

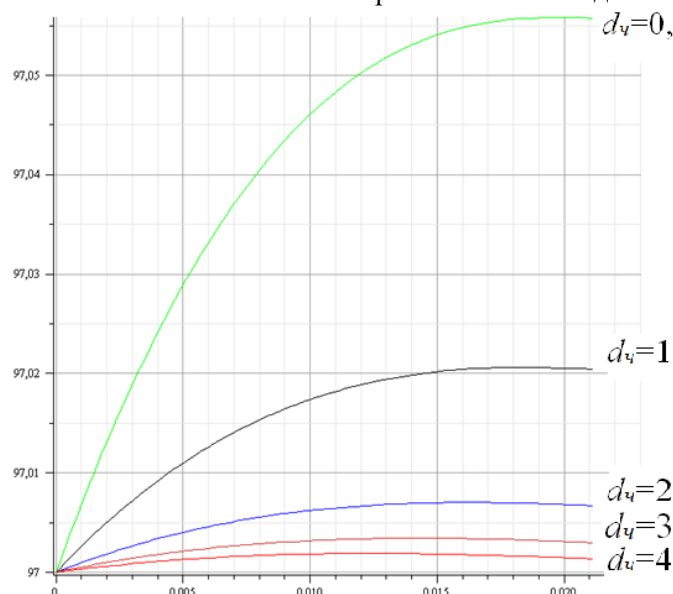


Рис. 2. График зависимости изменения скорости движения частицы от текущей координаты высоты разгонной трубки.

Выводы. Выше изложенное, позволяет использовать формулу (21) для моделирования поведения частиц измельчаемого материала в струйной мельнице с плоской помольной камерой торообразной формы. По графику (рис. 2) можно определить расстояние эффективного пролета частиц в зависимости от их размера, из условия достижения максимальной их скорости, что положительно скажется на определении длины от среза вертикальной разгонной трубки до отбойного элемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акунов В.И. Экспериментальные исследования установок для тонкого измельчения с противоточными струйными мельницами. Автореферат. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М: ВНИИНСМ, 1961. 229с.
2. Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф. Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 82–88.
3. Уваров В.А. Разработка, исследование, методика расчёта конструктивно-технологических параметров противоточных струйных мельниц: автореф. дисс. канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 1996. 22 с.
4. Старчик Ю.Ю. Струйная мельница с цилиндрической камерой помола: автореф. дисс. канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2009. 22 с.

5. Патент РФ на полезную модель № 2020119726, 08.06.2020. Струйная противоточная мельница с дополнительной помольной камерой // Патент России № 199423. 2020 / Фадин Ю.М., Булгаков С.Б., Шеметов О.М., Шеметов Е.Г.
6. Шеремет Е.О. Исследование пневмоструйной мельницы для получения микроцемента: автореф. дисс. канд. техн. наук. БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2019. 22 с.
7. Энциклопедия по машиностроению. Общезаводское оборудование. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Web-browser (Internet Explorer). URL: <https://studfile.net/preview/7493544/page:15/> (дата обращения 20.10.2020)
8. Патент РФ на полезную модель № 2019115765, 22.05.2019. Струйная мельница для сверхтонкого помола // Патент России № 190985. 2019. Бюл. № 20. / Дмитриенко В. Г., Логачев И. Н., Логачев К. И., Шеметов Е. Г., Шеметова О. М., Чередниченко Е. С.
9. Hegazy K. North America's expanding markets // World Cement. Emerging Markets. 2008. Pp. 65–70.
10. Stoiber W. Comminutoin technology and energy consumption // Cement International Vol. 2. 2003. Pp. 44–52.
11. Старчик Ю.Ю., Дмитриенко В.Г., Шеметов Е.Г. Математическая модель определения скоростей энергоносителя в струйной мельнице с цилиндрической камерой помола // Механизация строительства. 2016. Том 77. № 5. С. 47–52.
12. Yang D. Grinding innovation // World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 43–44.

13. Reinhardt Y. Effective Finish Grinding // World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 93–95.

14. Ludwig, H. Influence of the Process Technology on the manufacture of the market oriented cement // Cement International. 2003. Vol. 6. Pp. 74–88.

15. Клячко Л.С. Уравнения движения пылевых частиц в пылеприёмных устройствах // Отопление и вентиляция. №4. 1934. С. 27–29.

Информация об авторах

Дмитриенко Виктор Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: v_dmitrienko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронов Виталий Павлович, кандидат технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: v.p.voronov2018@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шеметов Евгений Геннадьевич, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: zshemetov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шеметова Ольга Михайловна, аспирантка кафедры механического оборудования. E-mail: olga95kizilova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 01.02.2021 г.

© Дмитриенко В.Г., Воронов В.П., Шеметов Е.Г., Шеметова О.М., 2021

Dmitrienko V.G., Voronov V.P., Shemetov E.G., *Shemetova O.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: olga95kizilova@gmail.com*

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE TWO-PHASE FLOW MOTION AT THE OUTLET OF THE VERTICAL ACCELERATION TUBE OF A JET MILL WITH A PLANE GRINDING CHAMBER OF TORUS FORM

Abstract. Nowadays building material industry as well as other industry branches exercise bigger demand to use powders with high dispersion. Jet mills are used to produce such powders that is why development of new jet mill designs, increase of grind efficiency, reduction of specific energy consumption is an important objective. This article provides a mathematic description of the two-phase flow motion at the outlet of the vertical acceleration tube of a jet mill with a plane grinding chamber of torus shape. The part of the acceleration tube above the impact plate is essential for grinding, as the initial particle grind occurs at this very section, in the grind chamber. Moreover, the initial grind defines the size of particles, that are further reground at the mill chamber. As a result of theoretical calculations, a formula is obtained that allows to determine the height of the acceleration tube from the bump element at the specified speed parameters of the two-phase flow. The article also contains the graph, that shows how particle velocity depends on the current (specific) height point (value) of the acceleration tube. This graph demonstrates that particle size strongly affects the way they move in the grind chamber. The formula allows to calculate the effective propulsion range of particles, depending on theirs' size, by presuming they have the maximum velocity.

Keywords: jet mill, grinding chamber, acceleration tube, particle, two-phase flow.

REFERENCES

1. Akunov V.I. Experimental studies of installations for fine grinding with countercurrent jet mills. [Eksperimental'nyye issledovaniya ustanovok dlya tonkogo izmel'cheniya s protivotochnymi struynymi mel'nitsami]. Abstract. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. M: VNIINSM, 1961. 229 p. (rus)

2. Barakovskikh D.S., Shishkin S.F. The movement of a two-phase flow in the accelerating tube of a jet mill [Dvizheniye dvukhfaznogo potoka v razgonnoy trubke struynoy mel'nitsy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 5. Pp. 82–88. (rus)

3. Uvarov V.A. Development, research, methodology for calculating the design and technological parameters of countercurrent jet mills [Razrabotka,

issledovaniye, metodika raschota konstruktivno–tekhnologicheskikh parametrov protivotochnykh struynykh mel'nits]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Belgorod, 1961. 22 p. (rus)

4. Starchik Yu.Yu. A jet mill with a cylindrical grinding chamber [Struynaya mel'nitsa s tsilindricheskoy kameroy pomola]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Belgorod, 2009. 22 p. (rus)

5. RF patent for invention No. 2000128608/03, 16.11.2000. Device for vortex grinding of materials [Ustroystvo dlya vikhrevogo izmel'cheniya materialov]. Patent of Russia No. 2000128608. 2001. Bogdanov V.S., Shopina E.V., Bulgakov S.B., Galushko R.V. (rus)

6. Sheremet E.O. Investigation of a pneumatic jet mill for obtaining microcement [Issledovaniye pnevmostruynoy mel'nitsy dlya polucheniya mikrotsementa]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Belgorod, 2019. 22 p. (rus)

7. Encyclopedia of Mechanical Engineering. General plant equipment [Enciklopediya po mashinostroeniyu/Obschezavodskoe oborudovanie. System. demands: Web-browser (Internet Explorer). URL: <https://studfile.net/preview/7493544/page:15/> (date of the application 20.10.2020) (rus)

8. RF patent for invention No. 2019115765, 22.05.2019. Jet mill for ultrafine grinding [Struynaya

mel'nitsa dlya sverkh-tonkogo pomola]. Patent of Russia. No. 190985. 2019. Bul. No. 20. Dmitrienko V.G., Logachev I.N., Logachev K.I., Shemetov E.G., Shemetova O.M., Cherednichenko E.S. (rus)

9. Hegazy K. North America's expanding markets. World Cement. Emerging Markets. 2008. Pp. 65–70.

10. Stoiber W. Comminution technology and energy consumption. Cement International Vol. 2. 2003. Pp. 44–52.

11. Starchik Yu.Yu., Dmitrienko V.G., Shemetov E.G. Mathematical model for determining the velocities of an energy carrier in a jet mill with a cylindrical grinding chamber [Matematicheskaya model' opredeleniya skorostey energonosatelya v struynoy mel'nitse s tsilindricheskoy kameroy pomola]. Mechanization in construction. 2016. Vol. 77. No. 5. Pp. 47–52. (rus)

12. Yang D. Grinding innovation. World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 43–44.

13. Reinhardt Y. Effective Finish Grinding. World Cement. 2008. Vol. 3. Pp. 93–95.

14. Ludwig, H. Influence of the Process Technology on the manufacture of the market oriented cement. Cement International. 2003. Vol. 6. Pp. 74–88.

15. Klyachko L.S. Equations of motion of dust particles in dust collection devices [Uravneniya dvizheniya pylevykh chastits v pylepriyomnykh ustroystvakh]. Heating and ventilation. No. 4. 1934. Pp. 27–29. (rus)

Information about the authors

Dmitrienko Victor G. PhD, E-mail: v_dmitrienko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Voronov Vitaly P. PhD, Professor E-mail: v.p.voronov2018@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shemetov Evgeny G. Postgraduate student. E-mail: zshemetov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shemetova, Olga M. Postgraduate student. E-mail: olga95kizilova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 01.02.2021

Для цитирования:

Дмитриенко В.Г., Воронов В.П., Шеметов Е.Г., Шеметова О.М. Математическое описание движения двухфазного потока на выходе из вертикальной разгонной трубки струйной мельницы с плоской полой камерой торообразной формы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 82–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-82-86

For citation:

Dmitrienko V.G., Voronov V.P., Shemetov E.G., Shemetova O.M. Mathematical description of the two-phase flow motion at the outlet of the vertical acceleration tube of a jet mill with a plane grinding chamber of torus form. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 82–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-82-86

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-87-94

***Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Бражник Ю.В.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: vladeslav390@gmail.com

ПРИВЕДЕНИЕ РАВНОНАПРАВЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ К АСИММЕТРИЧНЫМ, ПУТЁМ ИЗМЕНЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ ВЕЛИЧИН, СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЫНУЖДАЮЩУЮ СИЛУ

Аннотация. Вибрационные машины играют важнейшую роль в реализации программ в строительном и дорожно-строительном комплексе. Совершенствование вибрационных машин позволяет существенно увеличить скорость выполнения строительных и дорожно-строительных работ. Основным рабочим узлом вибрационной машины является вибрационное устройство или вибратор. В настоящее время, в промышленности используются вибрационные устройства с круговыми или направленными, вдоль некоторой прямой колебаниями. Дальнейшее совершенствование вибромашин осуществляется в направлении создания вибрационных устройств с асимметричными колебаниями. В настоящее время практически отсутствуют вибрационные машины с асимметричными колебаниями. Эти машины позволяют выделить в пределах каждого периода колебаний фазу «рабочего» процесса и фазу «холостого хода». Причем, величина вынуждающей силы в фазе выполнения полезной работы в разы превышает величину вынуждающей силы в направлении выполнения холостого хода. Поэтому на выполнение холостого хода существенно меньше затрачивается работы. Это позволяет избавиться от массивных элементов – пригрузов, которые гасят величину вынуждающей силы в направлении выполнения холостого хода. Поэтому актуальность заключается в том, чтобы разработать метод перевода существующих машин с направленными колебаниями в асимметричные, с заданным коэффициентом асимметрии вынуждающей силы. Это позволяет снизить удельные показатели металлоемкости вибромашин и энергоемкость выполняемых работ.

Ключевые слова: вибрационные механизмы, асимметричные колебания, вынуждающая сила.

Введение. Статья посвящена вопросу повышения эффективности работы вибрационных механизмов строительных и дорожных машин [1, 11, 15]. Направленные колебания генерируются вынуждающей силой, направление действия которой осуществляется вдоль некоторой прямой [2, 8]. Величина вынуждающей силы в пределах одного периода колебаний изменяется от наибольшего, амплитудного, положительного значения ($+F_{max}$) до нуля, далее, до наибольшего, отрицательного значения ($-F_{max}$) и обратно. Силы $+F_{max}$ и $-F_{max}$, действующие поочередно в противоположных направлениях, являются составляющими вынуждающей силы F .

Как правило, вынуждающая сила F выполняет полезную работу, действуя в одном, например, положительном, направлении, а в противоположном, например, в отрицательном, работу холостого хода. Логично, если в пределах периода колебаний составляющая, действующая в направлении выполнения полезной работы была бы увеличена в некоторое количество раз, при соответствующем уменьшении величины составляющей, действующей в направлении выполнения холостого хода.

Материалы и методы. В статье используются классические методы анализа источников информации по выбранной теме, классические методы теории механических колебаний и чис-

ленные методы оценки вибрационных процессов, позволяющих, на основе полученных результатов, существенно повысить эффективность вибрационного дорожно-строительного оборудования и машин на базе разработанного метода перевода направленных гармонических колебаний в асимметричные колебания с заданным коэффициентом асимметрии суммарной вынуждающей силы.

Основная часть. Такие попытки предпринимались некоторыми исследователями, что нашло отражение в ряде работ [3–6]. Некоторые работы интересны тем, что в них полученные результаты и рекомендуемые параметры колебаний, как бы, не формулируют такую задачу, но подразумевают получение несимметричных колебаний, которые также могут называться асимметричными. В работах [1, 2] ещё не вводится численного значения величины, которой можно оценивать величину соотношения составляющих вынуждающей силы ($+F_{max}$) и ($-F_{max}$). В работах [4–6] введено определение, характеризующее величину несимметрии вынуждающей силы, которая называется коэффициентом динамичности вибрационной системы (k_d) или коэффициентом асимметрии вынуждающей силы (k_a), при этом:

$$k_d = k_a = \frac{+F_{max}}{|-F_{max}|} \geq 1,0 \quad (1)$$

Равенство $k_d = 1,0$ характерно для равнонаправленных колебаний.

В работе [3] имеются рекомендации для получения колебаний суммированием двух, трёх и четырёх вибраторов с направленными колебаниями, у которых кратные частоты вращения дебалансных валов. То есть, для двухступенчатого вибрационного устройства: $\omega_1:\omega_2 = 1:2$, для

трёхступенчатого - $\omega_1:\omega_2:\omega_3 = 1:2:3$, для четырёхступенчатого - $\omega_1:\omega_2:\omega_3:\omega_4 = 1:2:3:4$, соответственно. При этом, соотношение статических моментов дебалансов ($M_{ст}$) также подчинено числу ступеней дебалансных вибраторов с направленными колебаниями, (табл. 1).

Таблица 1

Соотношение параметров многоступенчатого вибрационного устройства с числом вибраторов с направленными колебаниями для их сложения: 2, 3, 4 [3]

Соотношение параметров	Число вибраторов (ступеней) с направленными колебаниями в вибрационном устройстве с несимметричными колебаниями		
	2-х ступенчатое вибрационное устройство	3-х ступенчатое вибрационное устройство	4-х ступенчатое вибрационное устройство
Частоты вращения дебалансных валов	$\omega_1:\omega_2$	$\omega_1:\omega_2:\omega_3$	$\omega_1:\omega_2:\omega_3:\omega_4$
ω	1:2	1:2:3	1:2:3:4
Статические моменты дебалансов	$m_1r_1:m_2r_2$	$m_1r_1:m_2r_2:m_3r_3$	$m_1r_1:m_2r_2:m_3r_3:m_4r_4$
$M_{ст} = m \cdot r$	6:1... 10:1 или 16,67 ... 10	100:16,64:3,68	100:18,72:5,6:1,58

Выполнив сравнительные расчёты и получив результаты можно получить ответ на идею способа генерирования механических колебаний и заложенных в него параметров. Принимаем численные значения частот вращения дебалансных валов, например, 600: 1200: 1800: 2400 об/мин. Угловые скорости, при этом, составят: 62,8: 125,6: 188,4: 251,2 рад/с. Частота колебаний, соответственно, составит: 10:20:30:40 кол/с. Время соответствующего периода колебаний: 0,1: 0,05: 0,033: 0,025 с.

Учитывая, что статический момент дебаланса определяется произведением массы дебаланса на радиус смещения его центра тяжести от оси вращения, то его величиной можно варьировать изменением одного сомножителя, оставляя второй неизменным, например, равным единице.

Составляем исходные данные для 2-х ступенчатого вибрационного устройства с соотношением $M_{ст1}:M_{ст2} = 6:1$ или в процентах: $M_{ст1}:M_{ст2} = 100\%:16,67\%$.

Результаты принятых исходных параметров сводим в (табл. 2).

Таблица 2

Исходные данные для расчёта суммарной вынуждающей силы двухступенчатого вибрационного устройства

p_i		№ вибратора	1	2
3,1416		Масса (кг)	25,3	4,22
		Радиус (см)	1	1
T		Нач. фаза (град)	0	0
0,10		Скорость (об/мин)	600	1200
dt		R (м)	0,01	0,01
0,005		φ_0 (рад)	0,00	0,00
		ω (1/с)	62,83	125,664

Масса дебалансов выбрана произвольно. Основным требованием сохраняется соотношение статических моментов первой и второй ступени. Результаты расчёта сведены в (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчёта суммарной вынуждающей силы двухступенчатого вибрационного устройства при соотношении статических моментов дебалансов: 6:1

№	t	F ₁	F ₂	Сумма
0	0,000	2,00	1,33	3,33
1	0,005	1,90	1,08	2,98
2	0,010	1,62	0,41	2,03
3	0,015	1,17	-0,41	0,76
4	0,020	0,62	-1,08	-0,46
5	0,025	0,00	-1,33	-1,33
6	0,030	-0,62	-1,08	-1,70
7	0,035	-1,17	-0,41	-1,59
8	0,040	-1,62	0,41	-1,20
9	0,045	-1,90	1,08	-0,82
10	0,050	-2,00	1,33	-0,66
11	0,055	-1,90	1,08	-0,82
12	0,060	-1,62	0,41	-1,20
13	0,065	-1,17	-0,41	-1,59
14	0,070	-0,62	-1,08	-1,70
15	0,075	0,00	-1,33	-1,33
16	0,080	0,62	-1,08	-0,46
17	0,085	1,17	-0,41	0,76
18	0,090	1,62	0,41	2,03
19	0,095	1,90	1,08	2,98
20	0,100	2,00	1,33	3,33
	Max	2,00	1,33	3,33
	Min	-2,00	-1,33	-1,70
Коэффициент динамичности k _д =				1,96
Mст1 и Mст2 =		0,253	0,0422	
Mст1		100%	16,67%	
%:Mст2% =		6	1	

Максимальная величина сил первой и второй ступени составила: $F_1 = 2,0$ кН; $F_2 = 1,33$ кН. Суммарная величина вынуждающей силы в «положительном» направлении имеет максимальное значение $F_{\text{сумм}+} = 3,33$ кН. Величина суммарной вынуждающей силы в «отрицательном» направлении: $F_{\text{сумм}-} = -1,7$ кН. Соотношение модулей этих сил составляет коэффициент динамичности колебательной системы, $k_d = 1,96$. Он показывает, во сколько раз величина составляющей вынуждающей силы, действующей с одним направлением превышает величину составляющей вынуждающей силы, действующей в противоположном направлении.

График изменения величины суммарной вынуждающей силы представлен на (рис. 1).

Для дальнейшего рассмотрения характера изменения величины вынуждающей силы в пределах одного периода колебаний, изменим начальную фазу дебаланса второй ступени на 180° . Тогда получим график, (рис.2).

Данный график демонстрирует не только наглядность изменения величины суммарной вынуждающей силы, но и её направление действия. В первом случае, (рис. 1), вынуждающая сила действует на «подъём», а во втором, (рис. 2), - на «погружение», что позволяет выполнять принципиально разные по назначению работы.

Аналогично формируем исходные параметры для двухступенчатого вибрационного устройства с соотношением статических моментов: 10:1; для трёхступенчатого и четырёхступенчатого вибрационных устройств с соотношениями статических моментов, указанных выше. Результаты расчётов сводим в (табл. 4).

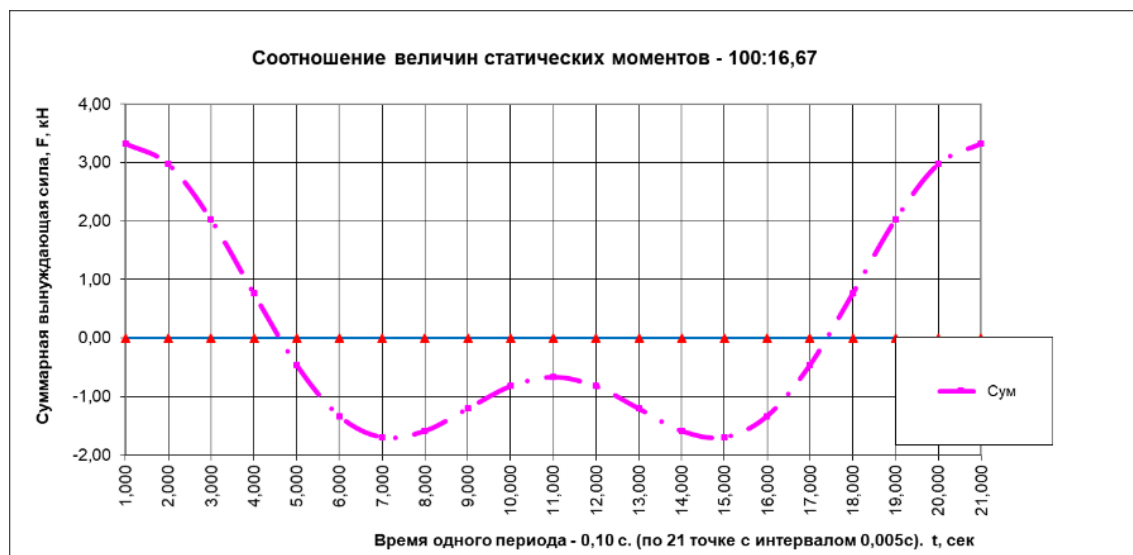


Рис. 1. Суммарная величина вынуждающей силы двухступенчатого вибрационного устройства с начальными фазами колебаний $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$

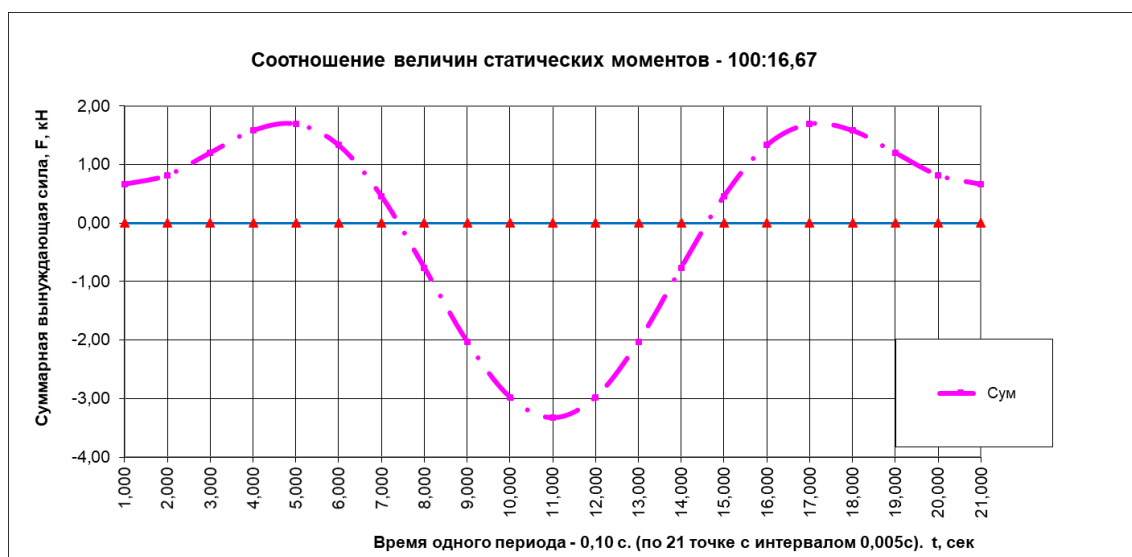


Рис. 2. Суммарная величина вынуждающей силы двухступенчатого вибрационного устройства с начальными фазами колебаний $\varphi_1 = 0$; $\varphi_2 = 180^\circ$.

Таблица 4

Результаты расчёта суммарной вынуждающей силы вибрационных устройств

Число ступеней	Соотношение статических моментов $M_{ст1}:M_{ст2}:M_{ст3}:M_{ст4}$	Модуль максимальной величины вынуждающей силы каждой ступени вибрационного устройства, кН				Суммарная вынуждающая сила	Коэффициент динамичности	График
		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F _{сумм}		
2	100: 16,7	2,0	1,33	-	-	3,33	1,96	рис.2
2	100:10	2,0	0,8	-	-	2,88	1,97	рис. 3
3	100: 16,64: 3,68	2,0	1,33	0,66	-	3,99	3,0	рис. 4
4	100: 18,72: 5,6: 1,58	2,0	1,5	1,01	0,51	5,0	4,0	рис. 5

Из результатов расчёта, (табл. 4), видно, что коэффициент динамичности 3-х и 4-х ступенчатого вибрационного устройства составляет, соответственно $k_{д3} = 3,0$ и $k_{д4} = 4,0$. Для 2-х ступенчатого вибрационного устройства величина коэффициента динамичности составляет $k_{д2} = 1,96$ – $1,97$. Можно показать, что величина коэффициента динамичности для 2-х ступенчатого

вибрационного устройства составляет 2,0, что является более предпочтительным, чем рекомендуемые соотношения [3].

Представляет интерес формы графиков изменения суммарной вынуждающей силы при двух-, трёх- и четырёхступенчатых вибрационных устройствах, соответственно, (рис. 3), (рис. 4), (рис. 5).

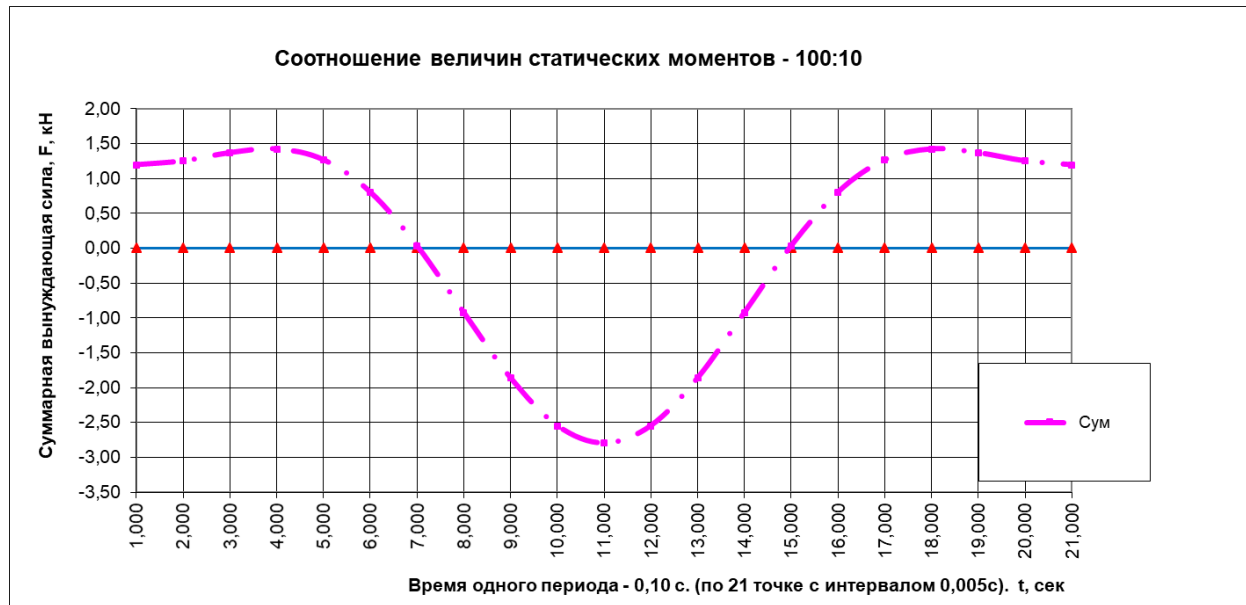


Рис. 3. Соотношение величин статических моментов – 100:10

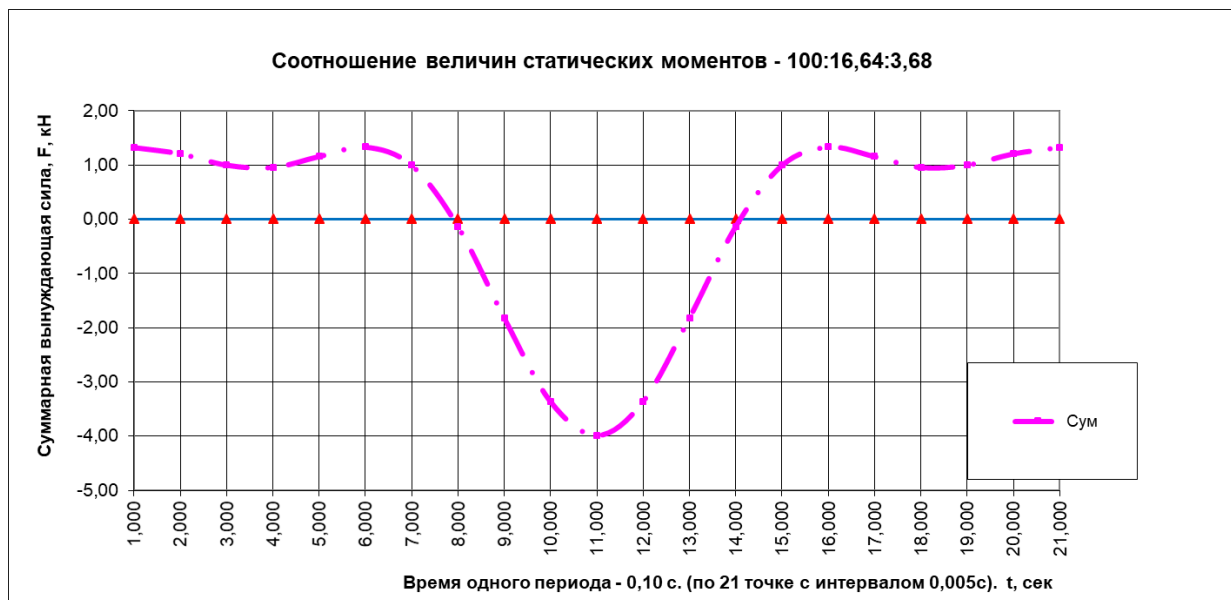


Рис. 4. Соотношение величин статических моментов – 100:16,64:3,68

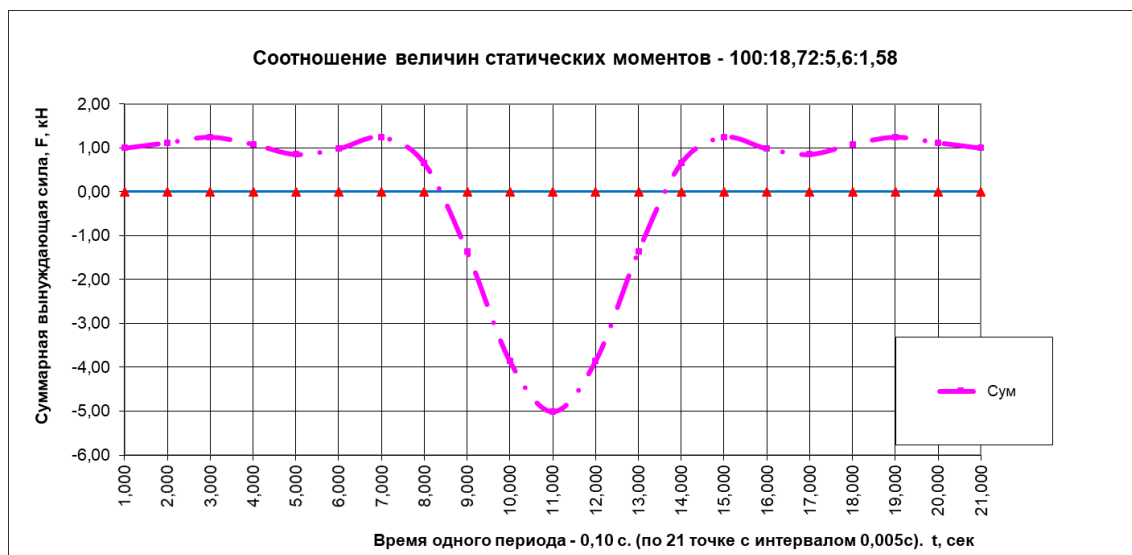


Рис. 5. Соотношение величин статических моментов – 100:18,72:5,6:1,58

Обращает на себя внимание, что время действия суммарной вынуждающей силы в пределах периода при увеличении числа ступеней, существенно снижается. Так, при двухступенчатом вибрационном устройстве, действие составляющей вынуждающей силы в направлении выполнения «полезной» работы по времени (dt_2) в пределах одного периода, составляет:

для двухступенчатого: $dt_2 = 0,35 \cdot T$, т.е. 35% времени периода колебаний;

для трёхступенчатого: $dt_3 = 0,25 \cdot T$, т.е. 25% времени периода колебаний;

для четырёхступенчатого: $dt_4 = 0,20 \cdot T$, т.е. 20% времени периода колебаний.

Такое положение позволяет [7,8,9] существенно увеличить эффект импульса вынуждающей силы.

Выводы

4. Анализ работы [3] показывает, что рекомендуемый в ней способ генерирования колебаний всецело относится к получению несимметричных, или асимметричных, колебаний.

5. В работе, также, не говорится о коэффициенте асимметрии суммарной вынуждающей силы. Однако в каждой многоступенчатой схеме вибрационного устройства, проявляется свой, заранее определённый коэффициент асимметрии суммарной вынуждающей силы.

6. Не вполне ясным является установление диапазона соотношений статических моментов дебалансов для двухступенчатого вибрационного устройства. Очевидно, это связано с сохранением некоторой информации, так как для такого вибрационного устройства легко достигается коэффициент асимметрии суммарной вынуждающей силы равный двум.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Челомей В.Н. Вибрации в технике: Справочник Т. 4. М.: Под ред. Э. Э. Лавендела, 1981. 509 с.
2. Primož O., Janko S., Miha B. Harmonic equivalence of the impulse loads in vibration fatigue // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 65. Pp. 631–640. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6197
3. Kleibl A, Heichel Ch. Vibration Generator. Patent US, no 7804211, 2009.
4. Анахин В.Д. Графоаналитический метод моделирования динамики систем с асимметричными колебаниями // Вестник бурятского государственного университета. 2018. С.223–228.
5. Gerasimov M.D., Romanovich M.A, Vorobiev N.D., Amini E. Results of research to improve efficiency of vibrating machines // International Conference “Complex equipment of quality control laboratories”. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series No 1118. 2018. Pp. 012015. doi:10.1088/1742-6596/1118/1/012015
6. Gerasimov M., Vorobiev N., Romanovich M., Amini E. The dynamic factor determination of the vibration mechanism with asymmetric vibrations/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. No 698. 2019. Pp. 066039. doi:10.1088/1757-899X/698/6/066039
7. Lubimyi N.S., Annenko D.M., Chepchurov M.S., Kostoev Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. Pp. 1–13.
8. Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Рязанцев В.Г. Методика проектирования вибропогружателя с асимметричными колебаниями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №5. С. 135–142.

9. Lubimyi N., Chetverikov B., Shepchurov M., Odobesko I. A method of determination of average plane of taps of pipes by a triangulation method using an anthropomorphic robot // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 709. Issue 3. Pp. 1–8.

10. Герасимов М.Д. Способ получения направленных механических колебаний для практического применения в технологических процессах // Строительные и дорожные машины. 2014. №1. С. 35–38.

11. Бауман В.А. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1970. 632 с.

12. Герасимов М.Д. Сложение колебаний в вибропогружателях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №3. С. 116–121.

13. Андриевский Б.Р., Гузенко П.Ю., Фрадков А.Л. Управление нелинейными колебаниями механических систем методом скоростного градиента // Автоматика и телемеханика. 1996. №4. С. 4–17

14. Fidlin A. Nonlinear oscillations in mechanical engineering. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2006. 358 p.

15. Лавандела Э.Э. Вибрации в технике: Справочник. М.: Машиностроение, 1981. Т.4. 509 с.

Информация об авторах

Рязанцев Владислав Геннадьевич, аспирант кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: vladislav390@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Герасимов Михаил Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: mail_mihail@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бражник Юлия Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: rrzhuaya@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.03.2021 г.

© Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Бражник Ю.В., 2021

***Ryazantsev V.G., Gerasimov M.D., Brashnik J.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: vladeslav390@gmail.com*

REDUCTION OF DIFFERENTLY DIRECTIONAL VIBRATIONS TO ASYMMETRICAL BY CHANGING THE RATIO OF VALUES COMPOSING THE DRIVING FORCE

Abstract. *Vibrating machines play a primary role in the implementation of programs in the construction and road construction kit. The improvement of vibration machines allows to significantly increase the speed of construction and road construction work. The main working unit of a vibrating machine is a vibrating device or vibrator. Currently, in the industry, vibration devices are used with circular or directional, along a certain straight line of vibrations. Further improvement of vibrating machines is carried out in the direction of creating vibration devices with asymmetric vibrations. At present, there are practically no vibrating machines with asymmetric vibrations. These machines allow to distinguish between the "working" process phase and the "idle" phase within each oscillation period. Moreover, the value of the driving force in the phase of performing useful work is several times higher than the value of the driving force in the direction of idling. Therefore, much less work is spent on idling. This allows to get rid of massive elements - overloads that extinguish the magnitude of the driving force in the direction of idling. Therefore, the urgency is to develop a method for converting existing machines with directional vibrations into asymmetric ones, with a given coefficient of asymmetry of the driving force. This makes it possible to reduce the specific indicators of the metal consumption of vibrating machines and the energy consumption of the work performed.*

Keywords: *vibration mechanisms, asymmetric vibrations, driving force.*

REFERENCES

1. Chelomey V.N. Vibration in technology. [Vibracii v tekhnike]: Handbook. Vol. 4. M.: Ed. E. E. Lavendel, 1981. 509 p. (rus)

2. Primož O., Janko S., Miha B. Harmonic equivalence of the impulse loads in vibration fatigue. Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 65. Pp. 631–640. DOI:10.5545/sv-jme.2019.6197

3. Kleibl A., Heichel Ch. Vibration Generator. Patent US, no 7804211, 2009.

4. Anakhin V.D. A graphoanalytical method for modeling the dynamics of systems with asymmetric oscillations [Grafoanaliticheskij metod modelirovaniya dinamiki sistem s asimmetrichnymi kolebaniyami]. Bulletin of the Buryat State University. 2018. Pp. 223–228. (rus)

5. Gerasimov M.D., Romanovich M.A., Vorobiev N.D., Amini E. Results of research to improve efficiency of vibrating machines. International Conference “Complex equipment of quality control laboratories”. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. No 1118. 2018. Pp. 012015. doi:10.1088/1742-6596/1118/1/012015

6. Gerasimov M., Vorobiov N., Romanovich M., Amini E. The dynamic factor determination of the vibration mechanism with asymmetric vibrations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. No. 698. 2019. Pp. 066039. doi:10.1088/1757-899X/698/6/066039

7. Lubimyi N.S., Annenko D.M., Chepchurov M.S., Kostoev Z.M. The research of the temperature effect on a metal polymer during flat grinding of a combined metal polymer part. Australian Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 80. Pp. 1–13.

8. Gerasimov M.D., Lubimyi N.S., Ryazantsev V.G. Methodology of vibro loader design with asymmetric oscillations. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. Vol. 5. Pp. 135–142.

9. Lubimyi N., Chetverikov B., Chepchurov M., Odobesko I. A method of determination of average plane of taps of pipes by a triangulation method using

an anthropomorphic robot. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 709. Issue 3. Pp. 1–8.

10. Gerasimov M.D. Method of obtaining directional mechanical vibrations for practical application in technological processes [Sposob polucheniya napravlennykh mekhanicheskikh kolebaniy dlya prakticheskogo primeneniya v tekhnologicheskikh proces-sah]. Bulletin of the Construction and road machines. 2014. No. 1. Pp. 35–38. (rus)

11. Bauman V.A. Vibrating machines in construction and building materials production [Vibracionnye mashiny v stroitel'stve i proizvodstve stroitel'nykh materialov]. Directory. M.: Mashinostroenie, 1970. 632 p. (rus)

12. Gerasimov M.D. Addition of vibrations in vibratory drivers [Dobavlenie vibracij v vibropogruzhateli]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 3. Pp. 116–121. (rus)

13. Andrievsky B.R., Guzenko P.Yu., Fradkov A.L. Control of Nonlinear Oscillations of Mechanical Systems by the Speed Gradient Method [Upravlenie nelinejnymi kolebaniyami mekhanicheskikh sistem metodom skorostnogo gradienta]. Bulletin of Automation and Telemechanics. 1996. No. 4. Pp. 4–17. (rus)

14. Fidlin A. Nonlinear oscillations in mechanical engineering. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2006. 358 p.

15. Lavandel E.E. Vibrations in Engineering. [Vibracii v tekhnike]: A Handbook. M.: Mechanical Engineering, 1981. Vol. 4. 509 p. (rus)

Information about the authors

Ryazantsev, Vladislav G. Postgraduate student. E-mail: vladeslav390@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Gerasimov, Mihail D. PhD. E-mail: mail_mihail@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Brashnik, Julia V. PhD. E-mail: rruzhaya@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 23.03.2021

Для цитирования:

Рязанцев В.Г., Герасимов М.Д., Брашник Ю.В. Приведение равнонаправленных колебаний к асимметричным, путём изменения соотношения величин, составляющих вынуждающую силу // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 87–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-87-94

For citation:

Ryazantsev V.G., Gerasimov M.D., Brashnik J.V. Reduction of differently directional vibrations to asymmetrical by changing the ratio of values composing the driving force. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 87–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-87-94

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПА

Аннотация. В статье представлена методика имитационного моделирования кинематических и динамических параметров робота-манипулятора модели KUKA KR 6 R900-2. Моделирование выполнено с использованием виртуального прототипа робота, спроектированного в системе автоматизированного проектирования КОМПАС 3-D и экспортированного в программный комплекс MSC Adams. Прототип робота представлен идеализированными деталями, соответствующими реальным звеньям конструкции. Сочленения звеньев реализованы шарнирными соединениями. Исследованы различные варианты отработки роботом заданной траектории движения при варьировании угловой скорости его поворотов и приложенной нагрузки потенциального груза: максимальная скорость при максимальной массе груза, номинальная скорость при номинальной массе груза и минимальная скорость при минимальной массе груза. Заданная траектория движения разбита на отдельные этапы, в каждом из которых при моделировании прикладывался определенный комплект рабочих нагрузок. Моделирование осуществлялось в трехкоординатном пространстве. Результатом моделирования являются кинематические параметры, такие как перемещение, скорость, ускорение и динамические параметры – моменты в шарнирах робота. Полученные результаты позволяют выполнить сравнительный анализ действующих нагрузок на различных этапах траектории, выявить неблагоприятные условия, такие как критические пиковые значения ускорений и возникающих моментов сил.

Ключевые слова: робот манипулятор, моделирование, виртуальный прототип, кинематические и динамические характеристики.

Введение. Широкое внедрение в различные типы производств роботов-манипуляторов связано с необходимостью замены человеческого труда на технологических этапах, требующих однотипных движений, таких как перемещение грузов, с целью повышения производительности и снижения риска ошибок в связи с утомляемостью исполнителя. Особенно актуально внедрение роботов-манипуляторов там, где требуется обеспечить высокую скорость перемещения объекта, его точное позиционирование в пространстве и стабильное во времени повторение циклов рабочих движений. При определении требуемого пространственного положения исполнительного звена робота необходимо обеспечить ряд условий и учесть накладываемые ограничения. Перемещаемый роботом объект должен двигаться с

заданной скоростью, иметь определенную точность позиционирования, а его траектория должна учитывать возможность столкновения с другими производственными объектами. Важным моментом являются также кинематические и динамические характеристики самого робота, возникающие под действием рабочих нагрузок при выполнении функциональных задач. Вопросы оптимизации траектории движения и ее моделирования исследуются рядом авторов и являются актуальной задачей [1–12].

Основная часть. В качестве исследуемого объекта выбран робот-манипулятор KUKA KR 6 R900-2. Данная модель представляет собой компактную шестиосевую конструкцию (рис. 1), рассчитанную на максимальную скорость работы, технические характеристики представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Технические характеристики робота-манипулятора KUKA KR 6 R900-2

Максимальный рабочий радиус	901 мм
Максимальная грузоподъемность	6,7 кг
Стабильность повторяемости позиций (ISO 9283)	± 0,02 мм
Количество осей	6
Площадь установки	208×208 мм
Вес	55 кг

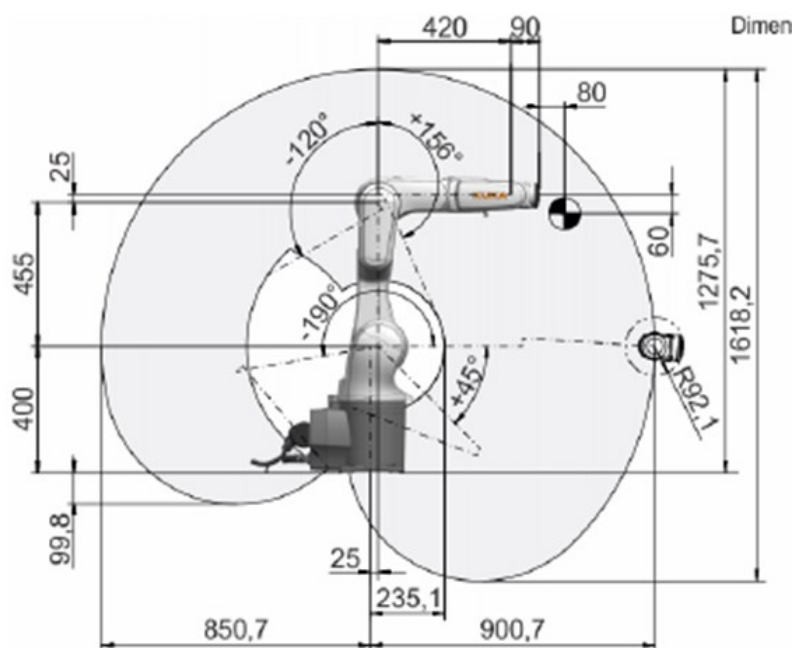


Рис. 1. Рабочая зона робота-манипулятора KUKA KR6 R900 sixx

Таблица 2

**Диапазон перемещений и максимально возможная скорость по осям
робота-манипулятора KUKA KR 6 R900-2**

Ось	Диапазон перемещений	Максимальная скорость при номинальной нагрузке (3 кг)
1	+/- 170°	360 °/с
2	+ 45° до -190°	300 °/с
3	+156° до -120°	360 °/с
4	+/-185°	381 °/с
5	+/- 120°	388 °/с
6	+/- 350°	615 °/с

Виртуальный прототип робота-манипулятора, представленный на рис.2, создан в системе автоматизированного проектирования КОМПАС 3-D и состоит из 6 идеализированных деталей (table_0, forearm_1, shoulder_2, elbow_3, wrist_4, brush_5), соответствующих звеньям робота: от основания (table_0) до исполнительного конечного звена (brush_5). Отдельные детали сопряжены друг с другом при помощи команд позиционирующего сопряжения (соосность/ параллельность/ совпадение). Массы и моменты инерции определены автоматически в системе. Созданная модель экспортирована в программный комплекс MSC Adams для дальнейшего имитационного моделирования кинематических и динамических параметров, характеризующих эксплуатационные условия под действием рабочих нагрузок.

Модель манипулятора расположена в трёхмерном координатном виртуальном пространстве: ось OZ направлена вертикально вверх и совпадает с осью вращения манипулятора, ось OX перпендикулярна оси OZ и направлена вдоль оси вращения конечного звена, ось OY направлена по

правилу левой руки. Для фиксации основания робота звено table_0 лишено всех степеней свободы с использованием команды FixedJoint. Конструктивные сопряжения звеньев робота реализованы шарнирными соединениями типа RevolutionJoint. Для имитации рабочих нагрузок к шарнирам table_0–forearm_1, forearm_1–shoulder_2 и shoulder_2–elbow_3 посредством команды RevolutionJointMotion приложены скорости вращения, заданные при помощи шаговой функции STEP. В качестве внешних сил приложены: сила тяжести G , направленная вертикально вниз (по оси OZ), и вес предполагаемого груза P , приложенный к конечному звену манипулятора brush_5, направленный вертикально вниз, также заданный при помощи функции STEP.

Функция STEP аппроксимирует идеальную математическую кусочно-заданную функцию, но без разрывов. Синтаксис функции STEP: STEP($q, q1, f1, q2, f2$), где: q – независимая переменная; $q1$ – начальное значение для q ; $f1$ – начальное значение для f ; $q2$ – конечное значение для q ; $f2$ – конечное значение для f .

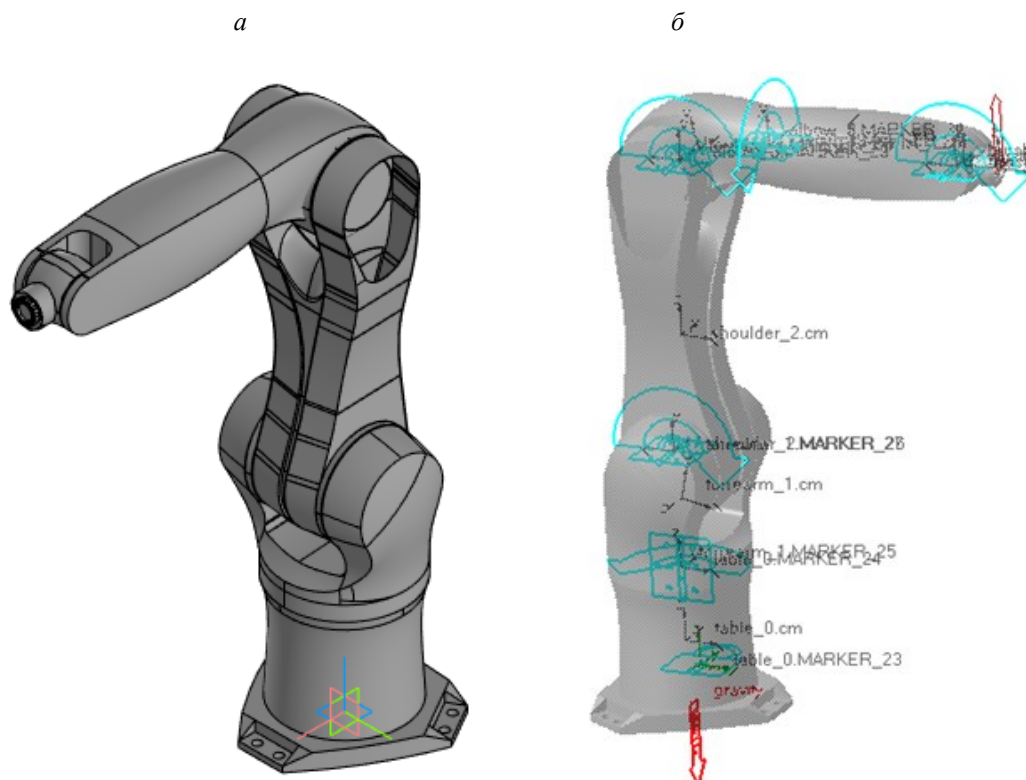


Рис. 2. Виртуальный прототип робота-манипулятора: *а* – модель, построенная в КОМПАС 3-D; *б* – имитационная модель, построенная в MSC Adams, с приложенными силами и моментами

Точность позиционирования робота не является одинаковой в пределах всего рабочего пространства. Ошибки позиционирования исполнительного звена связаны с положением груза в рабочем пространстве, с весом груза, а также с формой и направлением траектории движения. Измерения позиционных ошибок робота KUKA KR 210 R2700 (точность позиционирования 0,06 мм), выполненные с использованием лазерного трекера API Tracker3™ и беспроводной измерительной системы QC20-W Ballbar, показали существенные отклонения фактических погрешностей

от паспортных и их зависимость от зоны работы и траектории движения исполнительного звена [2]. Точность позиционирования снижалась при увеличении расстояния плеча от основания робота и уменьшения высоты рабочей зоны, значения погрешностей отличались при прямолинейной и криволинейной траектории. Паспортные характеристики диаграммы грузоподъемности робота KUKA KR 6 R900-2 представлены на рис. 3.

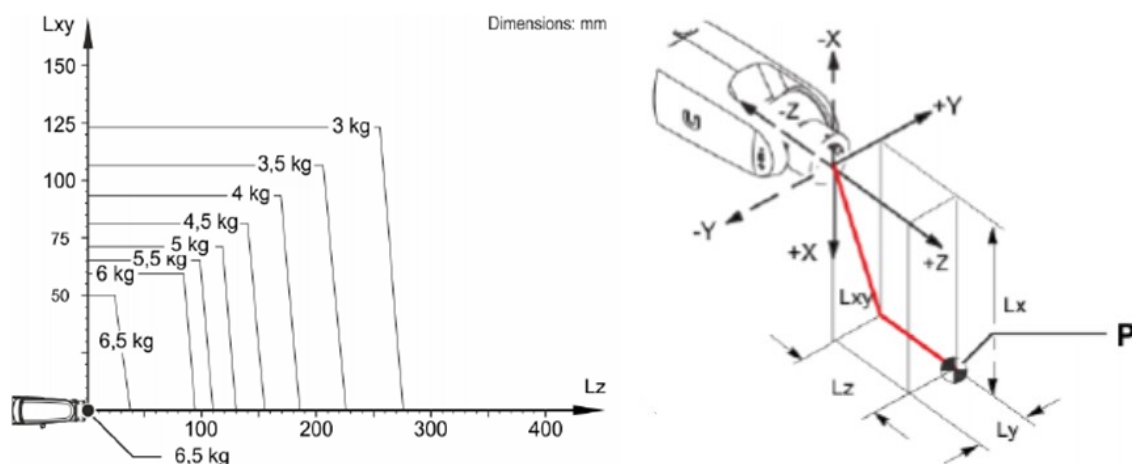


Рис. 3. Диаграмма грузоподъемности (LXYZ – расстояние от центра тяжести груза по осям X, Y, Z)

Влияние положения исполнительного звена на точность его позиционирования связано с конструктивными особенностями робота и возникающими в процессе движения кинематическими и динамическими нагрузками, такими как скорость, ускорение, силы и моменты сил. С использованием виртуального прототипа робота KUKA KR 6 R900-2 (рис. 2) было выполнено имитационное моделирование возникающих в процессе движения кинематических и динамических характеристик. Исследовались три варианта реализации заданной траектории: вариант №1 – движение с максимальной скоростью согласно паспортным характеристикам и с максимальной нагрузкой при массе груза 6,7 кг; вариант №2 – движение при номинальной средней скорости,

составляющей 50% от максимального значения, и при номинальной средней массе груза 3,35 кг; вариант №3 – движение с низкой скоростью, составляющей 10 % от максимального значения, и при минимальной нагрузке (масса груза 0,67 кг). Значения угловых скоростей в шарнирах `table_0-forrearm_1` (M1), `forrearm_1-shoulder_2` (M2), `shoulder_2-elbow_3` (M3), а также значение силы, имитирующей массу груза, для указанных вариантов приведены в таблице 3. Коэффициент k характеризует интенсивность скорости и нагрузки: для минимальной скорости и нагрузки $k = 0,1$ (10 %); для номинальной скорости и нагрузки $k = 0,5$ (50 %), для максимальной скорости и нагрузки $k = 1$ (100 %).

Таблица 3

Значения угловых скоростей в шарнирах и приложенной силы

	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
M1, °/с	$\omega_{1\max}=360$	$\omega_{1n}=k \cdot \omega_{1\max}=180$	$\omega_{1\min}=k \cdot \omega_{1\max}=36$
M2, °/с	$\omega_{2\max}=300$	$\omega_{2n}=k \cdot \omega_{2\max}=150$	$\omega_{2\min}=k \cdot \omega_{2\max}=30$
M3, °/с	$\omega_{3\max}=360$	$\omega_{3n}=k \cdot \omega_{3\max}=180$	$\omega_{3\min}=k \cdot \omega_{3\max}=36$
P , Н	$P_{\max}=67$	$P_n=k \cdot P_{\max}=33.5$	$P_{\min}=k \cdot P_{\max}=6.7$

Исследование кинематических и динамических характеристик робота выполнялось для траектории движения, представленной на рисунке 4. Моделирование заданной траектории движения с использованием виртуального прототипа реализовано с применением модуля Adams.View. Указанная траектория разбита на этапы, при этом для имитации реального движения робота каждому этапу соответствует определенный набор нагрузок, приложенных к модели:

0–1 – подвод манипулятора из начального положения без груза, вращение в шарнирах M2 (90°) и M3 (–90°) без приложения силы;

1–2 – поднятие груза весом P , вращение в шарнирах M2(–45°) и M3 (45°) с приложенной силой;

2–3 – поворот манипулятора с грузом весом P , вращение в шарнире M1 (180°) относительно оси OZ с приложенной силой;

3–4 – опускание груза весом P , вращение в шарнирах M2(45°) и M3 (–45°) с приложенной силой;

4–5 – отвод манипулятора без груза, вращение в шарнирах M2 (–90°) и M3 (90°).

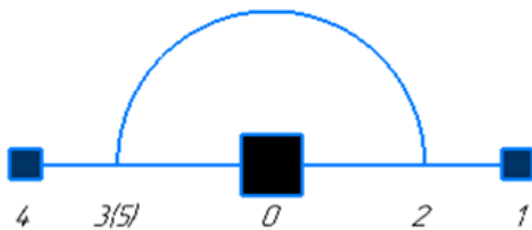
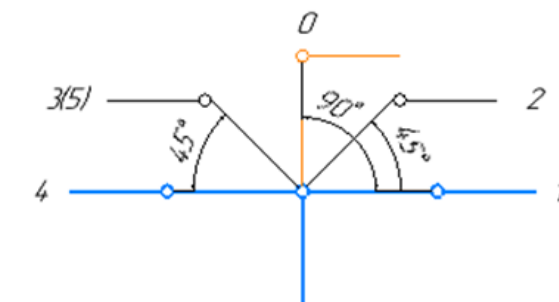


Рис. 4. Траектория движения робота-манипулятора

Таким образом, для данной траектории на каждом из указанных этапов необходимо осуществить поворот в шарнирах, относительно определенной координатной оси, с приложением или без приложения нагрузки. При моделировании это реализовано функцией STEP. Например, при движении 2–3 происходит поворот манипулятора



в шарнире `table_0-forrearm_1` (M1). Функция приложенной угловой скорости будет выглядеть следующим образом: STEP (time, 0.45/k, 0, 0.95/k, 0.5) $\times \omega_{1\max}$, где time – независимая переменная, в данном случае время; $\omega_{1\max}$ – максимальная угловая скорость для первого шарнира (360°/с); 0.45/k

– начальное значение времени; 0 – начальное значение угла; $0.95/k$ – конечное значение времени; 0.5 – конечное значение угла. Аналогичным образом записываются функции для всех этапов, затем объединяются в общую траекторию. Функции угловых скоростей, приложенных к шарнирам, и силы для заданной траектории приведены в таблице 4.

Так как скорость для трёх исследуемых вариантов движения по заданной траектории различна, то время работы манипулятора также изменяется. При реализации функции STEP это учитывается при помощи коэффициента k , который регулирует интенсивность скорости и нагрузки при отработке вариантов траектории.

Таблица 4

Функции скорости вращения в шарнирах и силы

	Функция
M1	$\text{STEP}(\text{time}, 0.45/k, 0, 0.95/k, 0.5) \times \omega_{1\max}$
M2	$\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 0.3/k, 0.3) \times \omega_{2\max} + \text{STEP}(\text{time}, 0.3/k, 0, 0.45/k, -0.15) \times \omega_{2\max} + \text{STEP}(\text{time}, 0.95/k, 0, 1.1/k, 0.15) \times \omega_{2\max} + \text{STEP}(\text{time}, 1.1/k, 0, 1.25/k, -0.15) \times \omega_{2\max}$
M3	$\text{STEP}(\text{time}, 0, 0, 0.25/k, 0.25) \times \omega_{3\max} + \text{STEP}(\text{time}, 0.3/k, 0, 0.425/k, -0.125) \times \omega_{3\max} + \text{STEP}(\text{time}, 0.95/k, 0, 1.075/k, 0.125) \times \omega_{3\max} + \text{STEP}(\text{time}, 1.1/k, 0, 1.225/k, -0.125) \times \omega_{3\max}$
P	$\text{STEP}(\text{time}, 0, 1, 0.001, 1) \times (P \times k) + \text{STEP}(\text{time}, 0.3/k, 0, 0.3001/k, -1) \times (P \times k) + \text{STEP}(\text{time}, 1.09999/k, -1, 1.1/k, 0) \times (P \times k)$

Результаты. Результатом моделирования являются кинематические параметры, такие как перемещение, скорость и ускорение, а также динамические – моменты сил в шарнирах. Все указанные параметры определяются как функции времени в привязке к выполняемой траектории для трех координатных осей. На графиках рис. 5 и рис. 6 изображены ускорения исполнительного звена в различных комбинациях движения по заданной траектории: при номинальной нагрузке (рис. 5) и совмещенный график трех вариантов интенсивности (рис. 6).

На графиках рис.7 и рис.8 представлены примеры возникающих под действием рабочей

нагрузки моментов в шарнирах конструкции робота, а в таблицу 5 сведены результаты моделирования для конструктивных шарнирных соединений робота (M1, M2, M3) при всех исследуемых вариантах движения по заданной траектории. Все полученные графики привязаны к траектории движения посредством функции времени, например, для варианта номинальной интенсивности подвод 0–1 осуществляется за период времени от 0 с до 0,6 с; этап движения 1–2 происходит за время 0,6 с – 0,9 с; поворот 2–3 реализуется за время 0,9 с – 1,9 с; подвод 3–4 – за время 1,9 с – 2,2 с; отвод 4–5 – за время 2,2 с – 2,5 с.

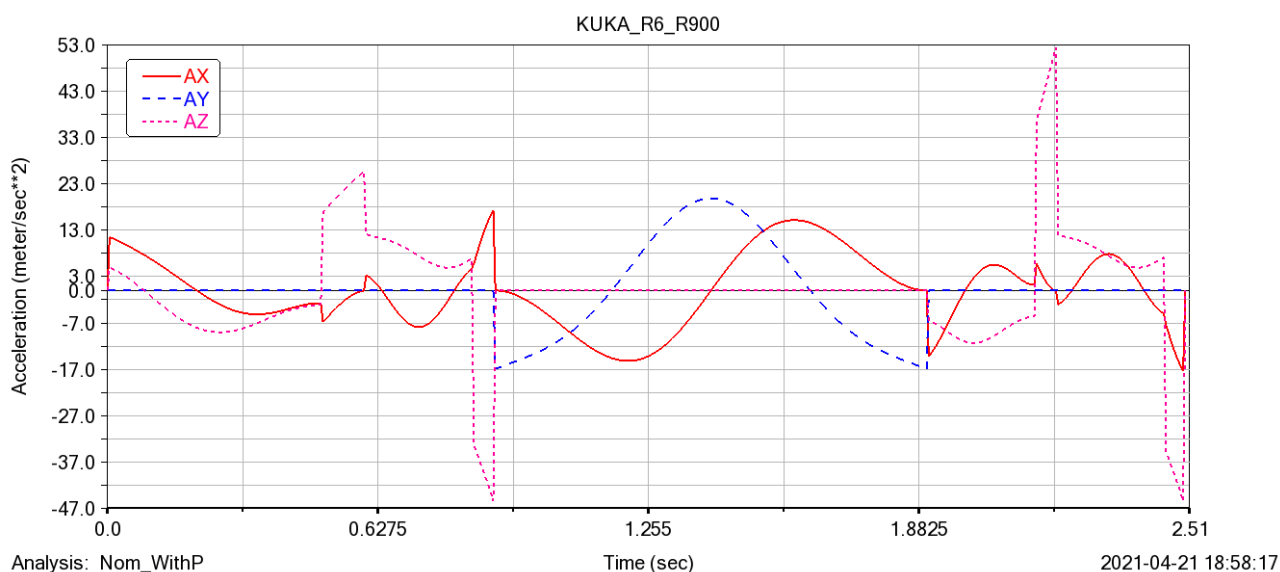


Рис. 5. Ускорение исполнительного звена при движении по заданной траектории при номинальной интенсивности (вариант №2)

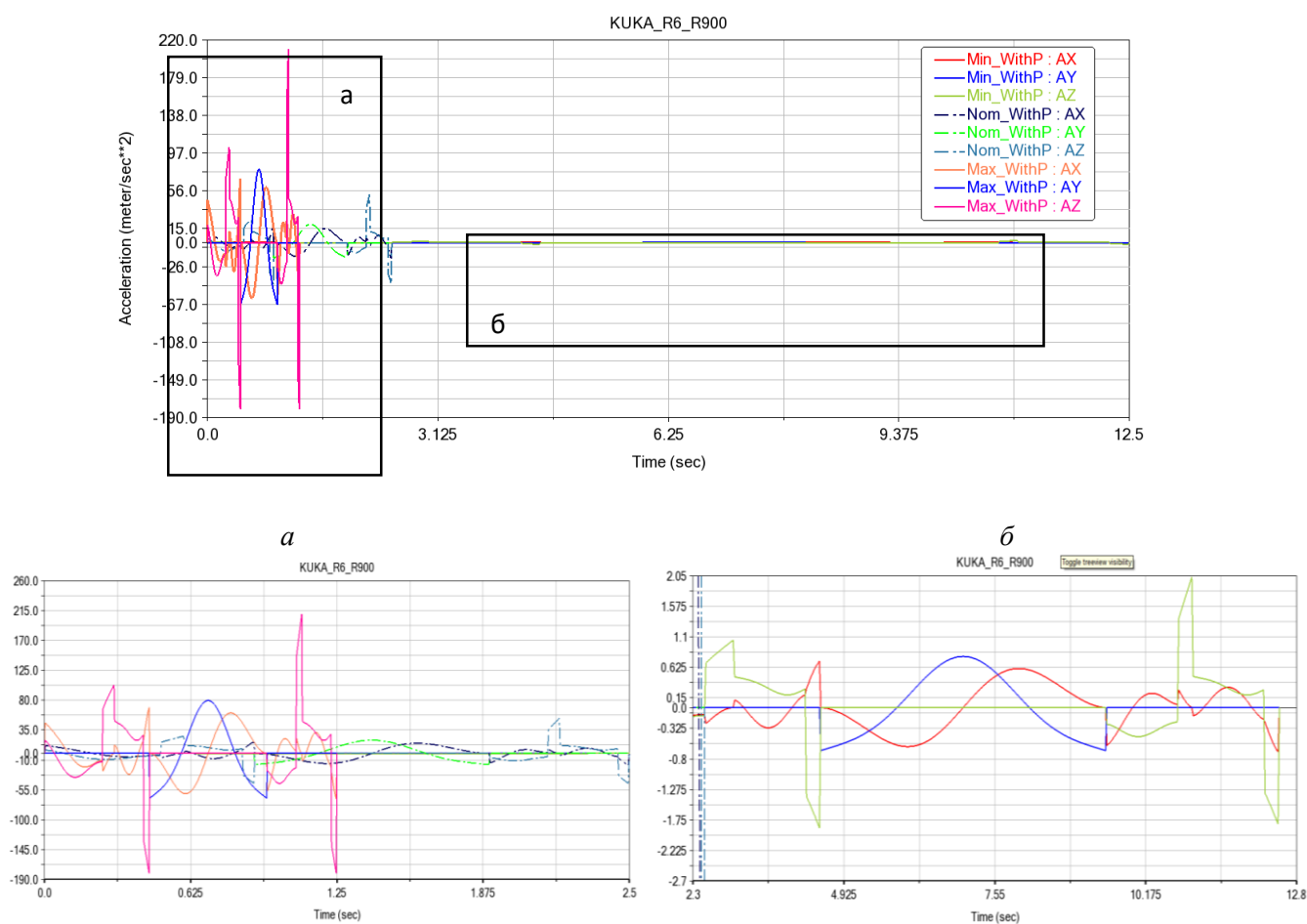


Рис. 6. Ускорение исполнительного звена при движении по заданной траектории для трех вариантов: с максимальной, номинальной и минимальной интенсивностью

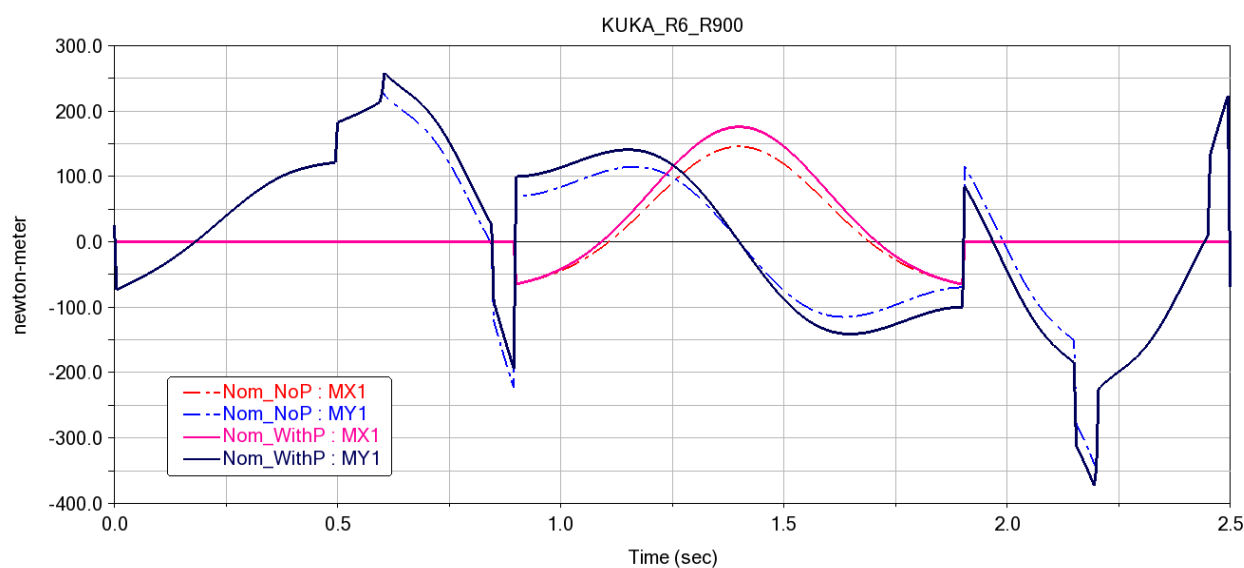


Рис. 7. Моменты в шарнире table_0 – forearm_1 (M1) при номинальной интенсивности (сплошные линии) и при минимальной интенсивности (штрихпунктирные линии)

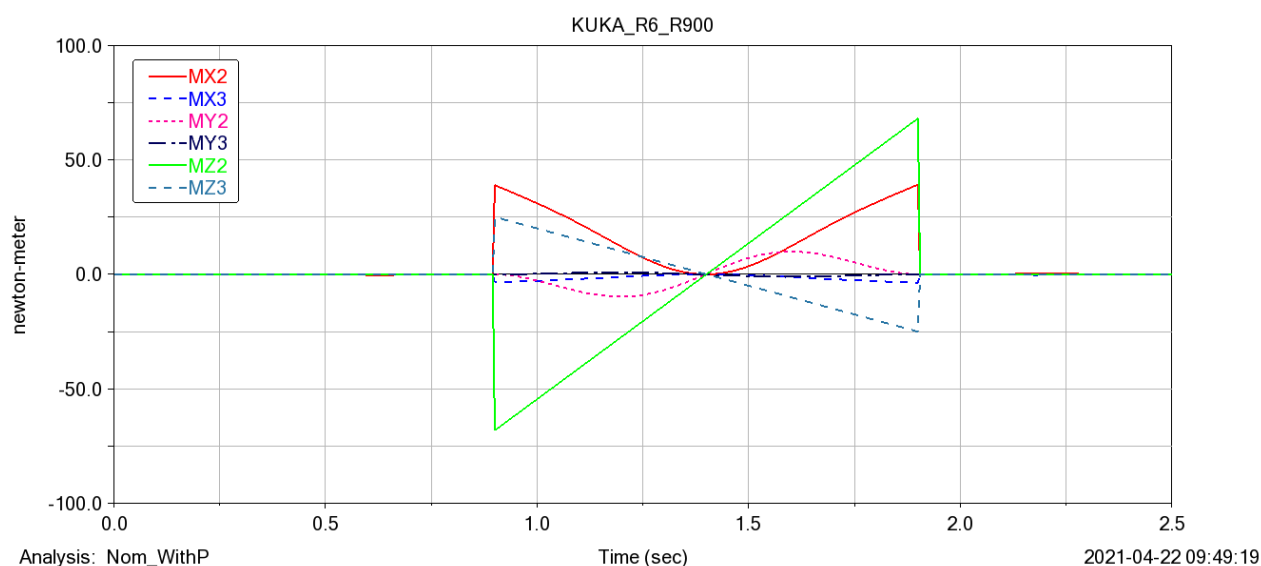


Рис. 8. Моменты в шарнирах forearm_1 – shoulder_2 (M2), shoulder_2 – elbow_3 (M3) при номинальной интенсивности (вариант №2)

Таблица 5

Пиковые значения моментов в шарнирах

Момент, Н/м	Наименование шарнира		
	table_0 – forearm_1 (M1)	forearm_1 – shoulder_2 (M2)	shoulder_2 – elbow_3 (M3)
Минимальная интенсивность (вариант №3)			
MX	78.75	1,66	- 0,29
MY	-101.15	0,47	- 0,17
MZ	0	2.7	- 0,97
Номинальная интенсивность (вариант №2)			
MX	175.86	39.25	- 3,7
MY	-372.71	9,93	- 0,96
MZ	0	68,17	- 25,06
Максимальная интенсивность (вариант №1)			
MX	434.24	156,65	- 14,58
MY	-1170.87	39,48	- 3,70
MZ	0	272,69	- 100,23

Выводы. Имитационное моделирование кинематических и динамических параметров с использованием программного комплекса MSC Adams позволяет получить ряд важных эксплуатационных характеристик исследуемой конструкции, в данном случае робота-манипулятора KUKA KR 6 R900-2. Результаты моделирования могут быть применены для сравнительного анализа действующих нагрузок на различных этапах движения по заданной траектории, выявления неблагоприятных условий, таких как критические пиковые значения ускорений и возникающих моментов сил. Например, для исследуемой конструкции при максимальной интенсивности скорости и массы груза в отдельные моменты движения по траектории наблюдаются моменты сил

свыше 1000 Н/м. Представленная методика применима для анализа и выбора возможных вариантов траектории, ее оптимизации по критерию снижения пиковых значений ускорений и моментов сил, которые оказывают неблагоприятное воздействие на эксплуатационный ресурс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чупрова Ю.К. Оптимизация траекторий рабочего органа манипулятора с шестью степенями свободы // Труды СПбГТУ. 2013. С. 62–67
2. Семёнов Е.Н., Сидорова А.В., Беломестных А.С., Чапышев А.П. Эффективное зонирование рабочего пространства промышленного ро-

бота KUKA KR210 R2700 EXTRA // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12(107). С. 86–96

3. Артеменко Ю.Н., Волкоморов С.В., Карпенко А.П. Система поддержки принятия решений для синтеза и оптимизации геометрии многосекционного робота-манипулятора типа хобот // Экстремальная робототехника. 2015. Т1. №1. С. 11–121.

4. Усачёв Ю.И. Моделирование роботизированных комплексов // Евразийский союз ученых. 2016 №2-4 (23) С. 98–100.

5. Каганов Ю.Т., Карпенко А.П. Синтез многосекционных роботов-манипуляторов параллельной структуры типа хобот // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020). 2020. С. 270–272.

6. Илюшин И.Э., Кожевников М.М. Алгоритмы управления сварочными роботами-манипуляторами на основе статистической модели конфигурационного пространства // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2016. №12. С. 22–29

7. Огородникова О.М., Путимцев И.Д. Использование облачных технологий в проектировании роботов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2017. №2. С. 105–108

8. Лоборева Л.А. Программное обеспечение OLP промышленных роботов-манипуляторов //

Вестник Полоцкого государственного университета. Серия с. Фундаментальные науки. 2018. №4. С. 108–116

9. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Шеменков В.М., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Оптимизация траекторий промышленных роботов-манипуляторов для лазерной резки // Вестник Белорусско-Российского университета 2020. №2(67). С. 21–30

10. Чуев К.В., Дуюн Т.А., Чуева Ю.А. Имитационное моделирование динамических характеристик промышленного робота с использованием программного комплекса MSC Adams // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского : Сборник докладов, 2020. С. 19–23.

11. Чуев К.В., Пашнев А.А., Чуева Ю.А., Кузнецова А. Д. Исследование деформаций, возникающих под воздействием статических нагрузок в промышленном роботе «ТУР-10» // XI международный молодежный форум "ОБРАЗОВАНИЕ. НАУКА. ПРОИЗВОДСТВО" Материалы форума. Белгород, 2019. С. 939–943.

12. Чуев К.В., Черкасов В.В., Чуева Ю.А. Решение прямой задачи о положениях для промышленного робота «ТУР-10» // XI международный молодежный форум "ОБРАЗОВАНИЕ. НАУКА. ПРОИЗВОДСТВО" Материалы форума. Белгород, 2019. С. 944–949.

Информация об авторах

Чуев Кирилл Витальевич, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Иван Александрович, студент кафедры технической кибернетики. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.04.2021 г.

© Чуев К.В., Дуюн И.А., 2021

***Chuev K.V., Duyun I.A.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: kirill.chuev@gmail.com*

SIMULATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A ROBOT MANIPULATOR USING A VIRTUAL PROTOTYPE

Abstract. The article presents a method for modeling the kinematic and dynamic parameters of the robot manipulator model KUKA KR 6 R900-2. The simulation is performed using a virtual prototype of a robot designed in the KOMPAS 3-D computer-aided design system and exported to the MSC Adams software package. The prototype of the robot is represented by idealized parts corresponding to the real links of the structure. The joints of the links are implemented by articulated joints. Various options of the robot working out a given trajectory of movement with varying the angular velocity of its turns and the applied load of the potential load are investigated: the maximum speed at the maximum weight of the load, the nominal speed at the nominal

weight of the load and the minimum speed at the minimum weight of the load. The specified trajectory of movement is divided into separate stages, a certain set of workloads is applied during the simulation in each. The simulation is carried out in a three-coordinate space. The result of the simulation is kinematic parameters, such as movement, speed, acceleration, and dynamic parameters – moments in the robot's joints. The obtained results allow to perform a comparative analysis of the operating loads at different stages of the trajectory, to identify unfavorable conditions, such as critical peak values of accelerations and emerging moments of forces.

Keywords: robot manipulator, simulation, virtual prototype, kinematic and dynamic characteristics.

REFERENCES

1. Chuprova I.K. Trajectory optimization for the end-effector of the 6-dof manipulator [Optimizatsiya traektorij rabocheho organa manipulyatora s shest'yu stepenyami svobody]. Proceedings of SPBSTU 2013. Pp. 62–67. (rus)
2. Semenov E., Sidorova A., Belomestnykh A., Chapyshev A. Effective zoning of KUKA KR210 R2700 EXTRA industry robot working space [E'ffektivnoe zonirovanie rabocheho prostranstva promy'shlennogo robota KUKA KR210 R2700 EXTRA]. Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2015. No. 12(107). Pp. 86–96. (rus)
3. Artemenko Yu.N., Volkomorov S.V., Karpenko A.P. decision support system providing geometry optimization of multisection arm robot manipulators [Sistema podderzhki prinyatiya reshenij dlya sinteza i optimizatsii geometrii mnogosekcionnogo robota-manipulyatora tipa xobot]. Extreme robotics. 2015. 1 (1). Pp. 11–121. (rus)
4. Yu I. Usachyov Simulation of robotic systems [Modelirovanie robotizirovanny'x kompleksov]. Eurasian Union of Scientists . 2016. No. 2-4 (23). Pp. 98–100. (rus)
5. Kaganov Y.T., Karpenko A.P. Synthesis of trunk-type parallel structure multisectional robots-manipulators [Sintez mnogosekcionny'x robotov-manipulyatorov paralel'noj struktury` tipa xobot] Design, technology and innovation in the textile and light industry (INNOVATION-2020) 2020. Pp. 270–272. (rus)
6. Iliushyn I., Kozhevnikov M. Algorithms for control of welding robotic-manipulator based on a statistical model of a configuration space [Algoritmy` upravleniya svarochny'mi robotami-manipulyatorami na osnove statisticheskoy modeli konfiguratsionnogo prostranstva]. Bulletin of the Polotsk state university. Series C. Fundamental sciences. 2016. No. 12. Pp. 22–29. (rus)
7. Ogorodnikova O.M., Putimcev I.D. Using cloud technologies in robot design Using cloud technologies in robot design [Ispol'zovanie oblachny'x texnologij v proektirovanii robotov. Rossiya molodaya: peredovy'e texnologii – v promy'shlenost']. Young Russia: advanced technologies-in the industry. 2017. No. 2. Pp. 105–108. (rus)
8. Loboreva L. Software of OLP for industrial robots-manipulators [Programmnoe obespechenie OLP promy'shlenny'x robotov-manipulyatorov]. Bulletin of the Polotsk state university. Series C. Fundamental sciences. 2018. No. Pp. 108–116. (rus)
9. Kozhevnikov M.M., Chumakov O.A., Shemenkov V.M., Ilushin I.E., Jurkina A.A. Trajectory optimization of industrial robot manipulators for laser cutting [Optimizatsiya traektorij promy'shlenny'x robotov-manipulyatorov dlya lazernoj rezki]. Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2020. No. 2(67). Pp 21–30. (rus)
10. Chuev K.V., Duyun T.A., Chueva Yu.A. Simulation of the dynamic characteristics of an industrial robot using the MSC Adams software package [Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskix xarakteristik promy'shlennogo robota s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa] All-Russian scientific and Methodological conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of N. P. Malevsky: Collection of reports. 2020. Pp. 19–23. (rus)
11. Chuev K.V., Pashnev A.A., Chueva Yu.A., Kuznecova A.D. Research of deformations arising under the influence of static loads in the industrial robot "TUR-10" [Issledovanie deformacij, vznikayushix pod vozdejstviem staticheskix nagruzok v promy'shlennom robote «TUR-10»] XI International Youth Forum " EDUCATION. THE SCIENCE. PRODUCTION" Forum materials. Belgorod. 2019. Pp. 939–943. (rus)
12. Chuev K.V., Cherkasov V.V., Chueva Yu.A. Solution of the direct position problem for the industrial robot "TUR-10" [Reshenie pryamoj zadachi o polozheniyax dlya promy'shlennogo robota "TUR-10"] XI International Youth Forum " EDUCATION. THE SCIENCE. PRODUCTION" Forum materials. Belgorod. 2019. Pp. 944–949. (rus)

Information about the authors

Chuev, Kirill V. Postgraduate student. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Ivan A. Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 25.04.2021

Для цитирования:

Чуев К.В., Дуюн И.А. Моделирование кинематических и динамических характеристик робота-манипулятора с использованием виртуального прототипа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 95–104. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-95-104

For citation:

Chuev K.V., Duyun I.A. Simulation of kinematic and dynamic characteristics of a robot manipulator using a virtual prototype. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 95–104. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-95-104