

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

7

2022

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**

№ 7, 2022 год

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

Vol. 7. 2022

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:

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 2.6.14. – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6. – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки) (до 16.10.2022)
- 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки) (до 16.10.22)

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
Е-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. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	12.07.2022
Выход в свет	21.07.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,53. Уч.-изд. л. 15,62. Тираж 40 экз. Заказ № 60

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:

- 2.1.1. – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 2.1.3. – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 2.1.5. – Building materials and products (technical sciences)
- 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13 – Machines, units and processes (branch-wise) (technical sciences) (to 16.10.2022)
- 05.17.06 – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences) (to 16.10.2022)

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:	12.07.2022

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).

Бурьянов Александр Федорович, д-р техн. наук, проф. НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва), исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации (РФ, г. Москва).

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).

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

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

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

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

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

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

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).

Леонович 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., и.о. директора Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

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 хозяйств Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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).

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).

Aleksandr F. Buryanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of civil engineering (National research university). (Russian Federation, Moscow).

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

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

Petr G. Grabov, 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. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, Director NIIZH 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, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (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. Strokov, 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

Бруяко М.Г., Баженова С.И., Ву Ким Зиен ЯЧЕЙСТЫЕ БЕТОНЫ С ВАРИАТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ НА СТАДИИ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ	8
Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Аль Мамури Саад Кхалил Шадид ПОЛУЧЕНИЕ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА И ОТХОДОВ БОЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА	19
Радайкин О.В., Сабитов Л.С., Ключев С.В., Хассун М.С., Аракчеев Т.П., Дарвиш А. СХОДИМОСТЬ ЧИСЛЕННОГО ДИАГРАММНОГО МЕТОДА НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЁТА СТЕРЖНЕВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	31
Холуянова Е.О. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ТИПОЛОГИИ ЕВРЕЙСКИХ ОБЩИННЫХ ЦЕНТРОВ	44
Пасечник И.Л. ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ КВАРТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОРИЧЕСКОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ КВАРТАЛА, ОГРАНИЧЕННОГО МАЛЫМ ПР., 11-ОЙ ЛИНИЕЙ, СРЕДНИМ ПР., 12-ОЙ ЛИНИЕЙ ВАСИЛЬЕВСКОГО ОСТРОВА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ)	55
Рощупкина О.Е., Перькова М.В. РАЗВИТИЕ ЗАПОВЕДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В РОССИИ В XVI – XXI ВВ.	66
Бочкарева Н.А., Калошина Л.Л. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ОПЫТА РЕСТАВРАЦИИ, РЕКОНСТРУКЦИИ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ ЭЛЕВАТОРОВ	78

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Трубицын М.А., Лисняк В.В., Фурда Л.В., Воловичева Н.А., Тарасенко Е.А. ДЕФЛОКУЛЯЦИЯ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ МАТРИЧНЫХ СИСТЕМ ДОБАВКАМИ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫХ ЭФИРОВ	91
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Любимый Н.С., Польшин А.А., Лозовая С.Ю., Тихонов А.А., Герасимов М.Д., Лямина С.А., Голубева Н.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНФОРМНЫХ КАНАЛОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПРЕСС-ФОРМ	101
Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Сычев Е.А. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ	110
Кобыльский Р.Э. ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЕ УПЛОТНЕНИЕ	117

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Bruyako M.G., Bazhenova S.I., Vu Kim Dien CELLULAR CONCRETES WITH AN VARIATROPIC STRUCTURE AT THE PRODUCT FORMING STAGE	8
Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.Kh., Sumskey D.A., Al Mamouri Saad Khalil Shadeed OBTAINING BINDER COMPOSITIONS OF OPTIMAL COMPOSITIONS BASED ON PORTLAND CEMENT AND CERAMIC BRICK WASTE	19
Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuev S.V., Hassoun M.S., Arakcheev T.P., Darvish A. CONVERGENCE OF THE NUMERICAL DIAGRAM METHOD OF NONLINEAR CALCULATION OF CORE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS	31
Kholuyanova E.O. TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL TYPOLOGY OF JEWISH COMMUNITY CENTERS	44
Pasechnik I.L. SPECIFIC ISSUES FOR THE RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF THE BLOCKS OF THE HISTORICAL URBAN ENVIRONMENT (ON THE EXAMPLE OF THE BLOCK BOUNDED BY MALIY PR., 11TH LINE, SREDNIY PR., 12TH LINE OF VASILYEVSKY ISLAND IN ST. PETERSBURG)	55
Roshchupkina O.E., Perkova M.V. DEVELOPMENT OF RESERVED TERRITORIES IN RUSSIA IN THE 16th – 21st CENTURIES	66
Bochkareva N.A., Kaloshina L.L. ANALYSIS OF MODERN EXPERIENCE OF RESTORATION, RECONSTRUCTION AND ADAPTATION OF GRAIN SILOS	78

CHEMICAL TECHNOLOGY

Trubitsyn M.A., Lisnyak V.V., Furda L.V., Volovicheva N.A., Tarasenko E.A. DEFLOCCULATION OF HIGH ALUMINA MATRIX SYSTEMS WITH POLYCARBOXYLATE ETHER ADDITIVES	91
--	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Lubimyi N.S., Polshin A.A., Lozovaya S.Yu., Tikhonov A.A., Gerasimov M.D., Lyamina S.A., Golubeva N.D. INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF CONFORMAL COOLING CHANNELS OF COMPOSITE MOLDS	101
Bogdanov V.S., Antsiferov S.I., Bogdanov D.V., Sychev E.A. STATE AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF GRINDING TECHNIC AND TECHNOLOGY	110
Kobylsky R.E. THE USE OF A COMBINED SEAL TO REDUCE THE LOAD ACTING ON THE CYLINDER PISTON SEAL	117

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-8-18

Бруйко М.Г., *Баженова С.И., Ву Ким Зиен

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com

ЯЧЕИСТЫЕ БЕТОНЫ С ВАРИАТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ НА СТАДИИ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты разработки одностадийного метода получения эффективных конструкционных и теплоизоляционных изделий на основе ячеистого бетона с вариатропной структурой и исследования их свойств. В статье приведены результаты исследований по определению влияния количественного соотношения исходных компонентов пеногазобетонной смеси и технологических режимов, для этого была создана модельная система $[Ca(OH)_2; Al; H_2O; NaF]$. Исследовано влияние коэффициента заполнения формы $(1, 0 \div 0, 7)$ формовочной пеногазобетонной смесью на формирование и свойства ячеистых бетонов с вариатропной структурой. Изучено влияние вариатропности ячеистых бетонов на прочностные характеристики изделий на их основе. Подтверждено, что изделия на основе ячеистого бетона с изменяющейся плотностью от периферии обладают достаточно хорошими теплоизоляционными свойствами за счёт низкой плотности в срединных слоях, при этом удовлетворяют всем требуемым показателями по прочности, твёрдости и морозостойкости благодаря высокой плотности поверхностного слоя. При этом отсутствие резкой границы предотвращает появление зоны контракционных напряжений и накопления конденсата. Результаты экспериментов подтверждают возможность получения изделий на основе вариатропных ячеистых бетонов с заданными свойствами, а также производство строительных изделий и элементов конструкций с более высокими прочностными показателями по сравнению с аналогичными изделиями на основе монотонных ячеистых бетонов при сохранении материалоемкости.

Ключевые слова: ячеистый бетон, вариатропная структура, газобетон, пенобетон, перфорированная форма.

Введение. Ячеистые бетоны конструкционно-теплоизоляционного назначения получили широкое распространение для производства строительных изделий при возведении малоэтажных зданий в качестве несущих элементов, а также при устройстве ограждающих конструкций и перегородок в многоэтажных гражданских и промышленных зданиях и сооружениях [1, 2].

Наиболее распространёнными технологическими способам получения ячеистых бетонов являются пенотехнология и газотехнология. Условия формирования бетонов по пенотехнологии и газотехнологии характеризуются монотропностью ячеистой структуры и характеристиками изделий по всему объёму. Ячеистые бетоны, полученные по пенотехнологии, обладают преимущественно закрытой пористой структурой. Бетоны, полученные по газотехнологии, характеризуются открытой пористой структурой. Характер пористой структуры ячеистых бетонов определяет эксплуатационную функциональность в качестве конструкционно-теплоизоляционных, и (или) акустических изделий [2–5].

Однако и в том и другом случае полученные изделия на основе пено- и газотехнологии характеризуются монотропностью, то есть постоянством свойств (прочность, теплоизолирующие

свойства, водопоглощение, диэлектрические свойства и так далее) бетонов по всему объёму изделия. Несущая способность изделий на основе ячеистых бетонов с монотропной структурой в основном зависит от их прочности и плотности. В связи с этим, для повышения несущей способности таких изделий требуется увеличение средней плотности бетона, что приводит к повышению их материалоемкости и снижению теплоизолирующих свойств. Поэтому решение проблемы, связанной с повышением несущей способности строительных элементов и изделий на основе ячеистых бетонов может быть обеспечено формированием и фиксированием вариатропной ячеистой структуры бетонов в период производства изделий на их основе.

Вариатропный ячеистый бетон – материал переменной плотности, получаемый путем уплотнения поверхностных зон механическими, химическими или физическими (ультразвуковыми, электромагнитными, температурными и т. п.) воздействиями для повышения его прочностных, атмосферозащитных и теплоизолирующих свойств. Изделия на основе ячеистого бетона с изменяющейся плотностью обладают низкой плотностью и более высокими теплоизоляционными свойствами в центре, а во внешних слоях

образца более высокой плотностью и прочностными характеристиками. Морозостойкость изделий на основе ячеистых вариатропных бетонов достигается за счет образования плотных внешних бетонных слоев [6–10].

На основе анализа научно-технической и патентной литературы были выявлены наиболее актуальные и перспективные пути решения получения изделий с вариатропной ячеистой структурой. Так, например, профессор О.В. Коротышевский предлагает технологию и оборудование по приготовлению пенобетонной смеси, используя способ одностадийного турбулентно-кавитационного перемешивания компонентов смеси. Этот способ заключается в поризации смеси при пониженном давлении, которое составляет 0,8 от атмосферного. При таком способе поризации обеспечивается незначительная разнородность бетонной смеси и различие свойств ячеистого бетона по всему объему (в пределах до 8–12 %), а саму структуру можно отнести к монотропной [11].

В патенте [12] описан способ получения слоистой конструкции из ячеистых бетонных смесей с различной плотностью, который заключается в последовательной послойной заливке формовочных газобетонных смесей в трехсекционную форму со съемными внутренними перегородками. Внутренняя секция заполняется формовочной смесью обеспечивающую более низкую плотность бетона по сравнению с внешними слоями. После окончания процесса вспенивания, перегородки извлекаются. Данная технология формования газобетонных изделий обеспечивает переход от бетона с более высокой плотностью периферийных слоев к более низкой плотности в центральной части. Выше указанная технология обладает технологической сложностью формования изделий с вариатропной структурой и отсут-

ствием возможности удаления избыточной формовочной влаги на стадии формирования ячеистой структуры бетонного изделия.

В источниках [7–9, 13–16] для газобетона вариатропность достигается путем уплотнения выступающего над бортами формы поверхностного слоя толщиной 2–5 см. Уплотнение поверхностного слоя происходит путем прикатывания жестким валом, опирающимся на борта формы. К недостатку предложенного способа можно отнести уплотнение исключительно только верхнего слоя изделия.

Технология газобетона располагает и другими приемами придания вариатропности бетона, такими как прикатывание и вибрирование поверхности. Однако все эти способы не обеспечивают удаление избыточной формовочной воды в период формирования ячеистой структуры. [3, 5, 14, 17, 18]. В дальнейшем, в процессе набора прочности цементного камня происходит удаление избыточной формовочной несвязной воды с образованием микропор и дефектов структуры минеральной матрицы, которые снижают конечную прочность бетона и изделий на их основе.

В статье приведены результаты разработки одностадийного способа получения эффективных конструкционно-теплоизоляционных изделий на основе ячеистых бетонов с вариатропной структурой и исследование их свойств.

Материалы. Для получения монотропного пенобетона с плотностью 900 кг/м³ использовались следующие компоненты.

Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020: истинная плотность 3,10 г/см³, прочность цемента на сжатие в возрасте 3 суток – 27,2 МПа, в возрасте 28 суток – 46,1 МПа, НГ = 29,4 %.

Кварцевый речной песок с истинной плотностью 2,64 г/см³ и размером частиц от 0,14 мм до 0,63 мм использовался в бетонных смесях в качестве мелкого заполнителя (табл. 1).

Таблица. 1

Гранулометрический состав песка

Размер отверстия, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
Остатки на контрольных ситах, %	0	0	0,83	14,23	73,2	6,28
Полный остаток, %	0	0	0,83	15,06	88,26	94,54

Вода затворения соответствует нормативным требованиям ГОСТ 23732-2011.

Алюминиевая пудра соответствует ГОСТ 5494-95 «Пудра алюминиевая. Технические условия» или алюминиевые пасты в соответствии с ТУ.

Фтористый натрий соответствует ГОСТ 4463-76 «Реактивы. Натрий фтористый. Технические условия газообразования».

Использовался пенообразователь ЕАВАССОС с истинной плотностью 1,02 г/см³, который разбавляли водой в пропорции 2,5 %.

Для получения вариатропных ячеистых бетонов использовалась пено-газотехнология, которая заключалась в получении образцов из формовочной смеси, состоящей из минерального вяжущего, мелкого заполнителя, пенообразователя, воды, газообразователя и регуляторов процессов

газообразования. Технологии получения образцов заключалась в следующем (рис. 1): формовочная смесь (состоящая из вышеперечисленных компонентов) подвергалась смешению в быстром смесителе и вертикально загружалась в



форму с различным коэффициентом заполнения (K_3):

$$K_3 = K_1/K_2, \quad (1)$$

где K_1 – объем формовочной смеси, K_2 – объем формы.

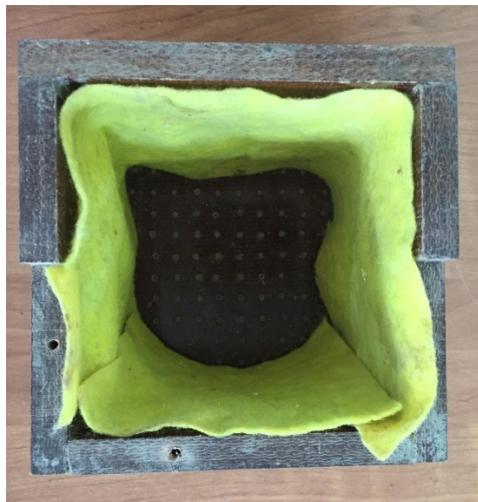


Рис. 1. Перфорированная форма

После чего форма закрывалась, и происходило формирование ячеистой структуры образца в изобарно-изохорных условиях.

Для получения образцов использовались формы в виде куба $15 \times 15 \times 15$ см с перфорированными стенками, диаметр отверстия $D=1,5$ мм, расстояние между отверстиями $a = 10$ мм.

Эффективность регуляторов газообразования в зависимости от химической природы исследовалась на модельной системе: оксид кальция, вода, алюминиевая пудра, фторид натрия. Определялась начало и конец газообразования и скорость газообразования в зависимости от количественного состава компонентов системы.

В работе исследовалось влияние изменения коэффициента заполнения формы ($1,0 \div 0,7$) формовочной пеногазобетонной смесью на формирование и свойства ячеистых бетонов с вариатропной структурой.

Методики. Определение влияния концентрации фтористого натрия на реакции газообразования с выделением водорода при взаимодействии алюминиевой пудры и щелочи (гидроксида кальция) проводилось на модельной системе $[\text{Ca}(\text{OH})_2; \text{Al}; \text{H}_2\text{O}; \text{NaF}]$. Определялись сроки начала и окончания газообразования, а также скорость газообразования H_2 в системе.

Методика заключалась в следующем: из реактора, в который помещались все исследуемые вещества модельной системы, выделяющийся в процессе реакции водород транспортировался в приемную емкость. За начало газообразования принималось начало образования пузырьков водорода. Скорость газообразования определялась

по изменению объема образованного водорода в единицу времени. По данной методике определяли следующие показатели: влияние концентрации NaF на начало и окончание процесса газовойделения, скорость и общий объем выделенного водорода.

Метод определения изменяемой средней плотности вариатропного материала в объеме образца. Растворная смесь в заданных соотношениях исходных компонентов перемешивалась на высокоскоростном смесителе до получения однородной пеномассы. Смесь помещалась в форму с перфорированными боковыми поверхностями с различным коэффициентом заполнения и закрывалась крышкой, которая фиксировалась запорными механизмами. По окончании процесса вспенивания образец извлекался для проведения дальнейших исследований полученных свойств.

Результаты и обсуждение. Для получения образцов с различным коэффициентом вариатропности форма заполнялась формовочной смесью с различным значением коэффициента заполнения формы K_3 . После набора необходимой распалубочной прочности образца форма распалубывалась и полученный образец подвергался дальнейшим исследованиям. Для этого вырезались образцы-кубики из периферийных и центральных зон для определения вариатропности образца.

Для управления процессом вспенивания при получении газобетонов были проведены исследования о влиянии концентрации фторида натрия

на процесс газообразования на модельной системе $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ (рис. 2, 3). В результате было установлено, что соотношение $\text{Al}:\text{NaF}$, равное 1:1, является оптимальным для ускорения процессов начала и окончания газообразования, а

так же для увеличения скорости выделения водорода в исследуемой композиции с целью получения на ее основе вариатропной структуры ячеистых бетонов.

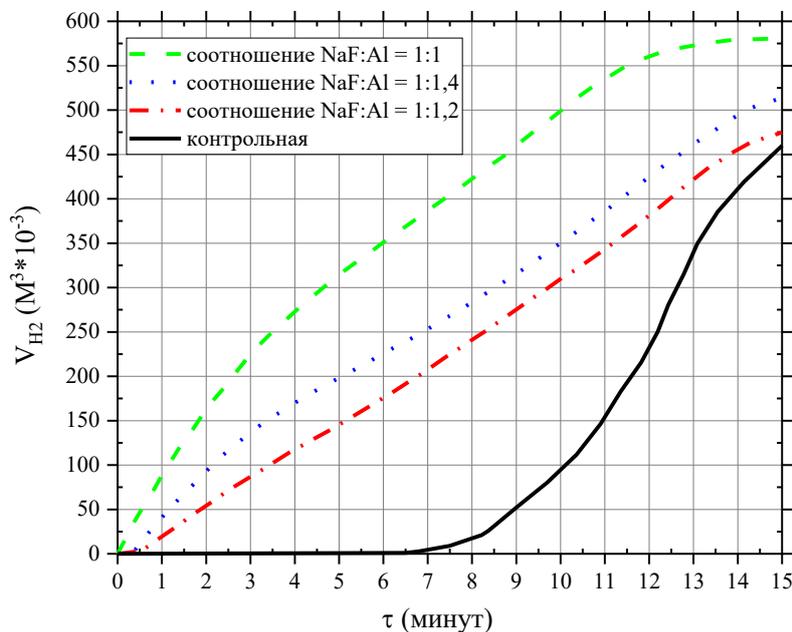


Рис. 2. Зависимость изменения газовыделения H_2 на модельной системе $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ от концентрации NaF

При исследовании изменения сроков начала и окончания газообразования от концентрации фторида натрия были получены следующие зависимости, представленные на рисунке 3. В результате воздействия окиси алюминия на поверхности алюминиевой пудры удаляется, что обеспечивает ускорение реакции химического взаимодействия между алюминием и оксидом кальция.

Из рисунков 2 и 3 видно, что присутствие в системе NaF активирует процесс газовыделения водорода. Повышение концентрации NaF интенсифицирует процесс газовыделения без увеличения концентрации газообразователя, а именно время начало-окончание и скорость образования водорода для придания вариатропности структуре изделия.

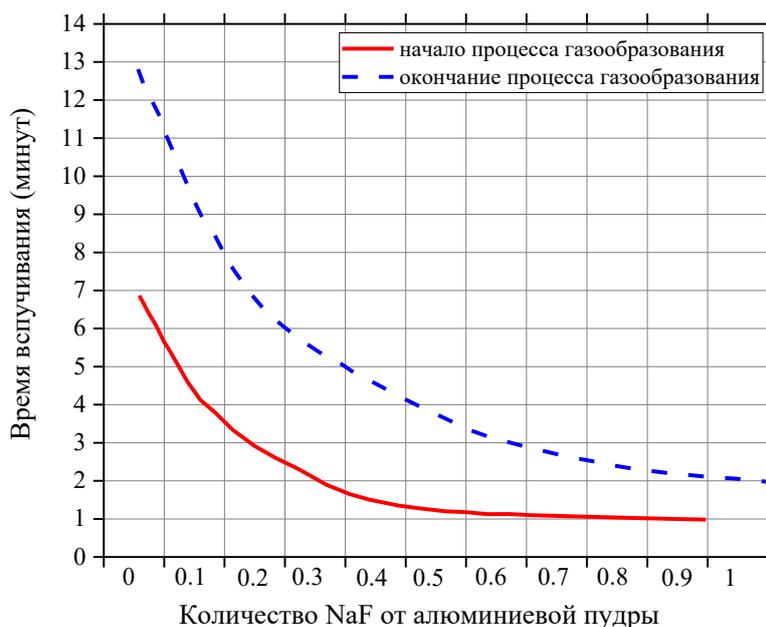


Рис. 3. Изменение сроков начала и окончания газообразования H_2 на модельной системе $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ от концентрации NaF

При производстве ячеистого бетона по пено-технологии в системе характерно повышенное водо-твёрдое отношение, где воды значительно больше, чем необходимо для процессов гидратации вяжущего. Снижать водотвёрдое отношение путём удаления избыточной формовочной воды на стадии формования массива при формировании структуры предполагается с использованием перфорации боковых стенок формы.

После заливки предварительно вспененной смеси с определенным коэффициентом заполнения формы происходит дальнейшее увеличение объема массы в результате процесса газообразования. До момента полного заполнения формы процесс формирования структуры происходит в изобарном режиме, дальнейшее формирование структуры осуществляется в изохорном режиме с

повышения давления внутри вспениваемой массы. Повышение давления внутри системы происходит за счет выделения водорода, что способно обеспечить такой градиент давления с внешней средой, который будет способен удалить через перфорированные стенки формы последовательно газообразной и жидкой фазы. В это время последовательно удаляются через перфорацию боковых стенок из растворной смеси: газообразные продукты, цементное молоко, с последующей кольматацией отверстий формы. Нетканый волокнистый материал в пристеночной части изделия, между перфорированными стенками формы и изделием впитывая удерживает цементное молоко и препятствует кольматации отверстий перфорации формы (рис. 4).



Рис. 4. Процесс вспучивания

В результате протекающих процессов в форме окончательно формируется вариатропная структура бетона. При этом периферийные слои бетона имеют значения средней плотности до 1800 кг/м^3 , а в центральной части образца средняя плотность может иметь значение менее 400 кг/м^3 . Следует отметить плавный переход более плотной части вариатропного бетона к поризованной его части. В зависимости от коэффициента заполнения формы и индекса перфорации формы возможно изменять соотношение и величину объема плотной и поризованной части вариатропного бетона. При этом коэффициент вариатропности может достигать значения $2,2 \dots 2,4$, а

по общим характеристикам такой бетон может использоваться для производства строительных изделий конструкционно-теплоизоляционного назначения.

Зависимость изменения плотности материала для различной степени заполнения формы показана на рисунке 5. Коэффициент заполнения формы брался 1, 0.8 и 0.7 соответственно. При дальнейшем уменьшении значения K_1 давление, создаваемое в системе, оказывалось недостаточным для получения необходимых высоких значений плотности на периферии изделия.

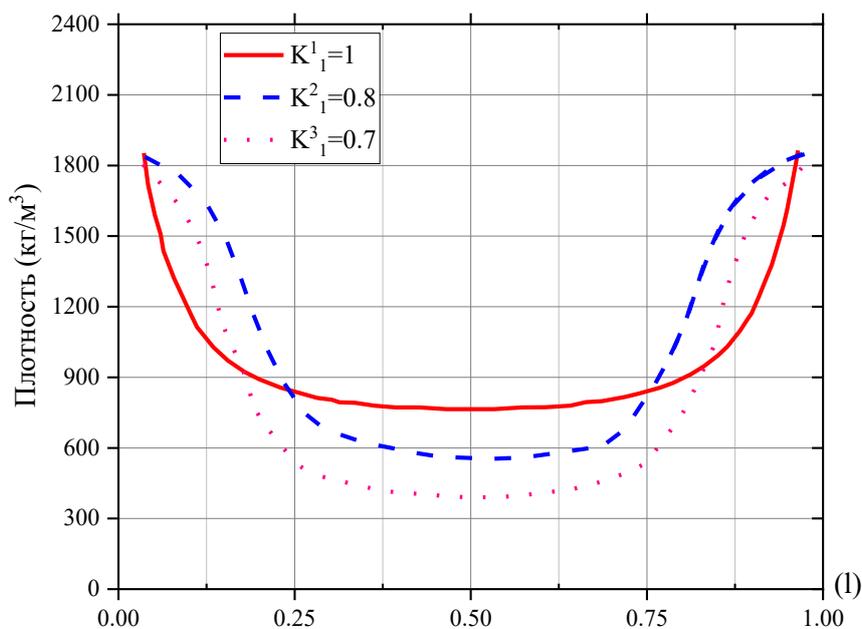


Рис. 5. Зависимость изменения плотности материала для различной степени заполнения формы

При производстве вариатропных материалов предлагается формировать изделие горизонтально в формах с перфорированными горизонтальными поверхностями. В данном случае под действием массы самой бетонной смеси увеличивается давление на нижний слой бетона по сравнению с верхним. В результате плотность, а, следовательно, и прочность, корки изделия у основания

будет немного выше, чем в верхней части. Так же происходит небольшое смещение минимума плотности относительно центра, которое зависит от высоты формы, то есть от толщины давящей бетонной смеси. Чем сильнее давление, тем больше разница плотности и прочности на горизонтальных границах изделия.

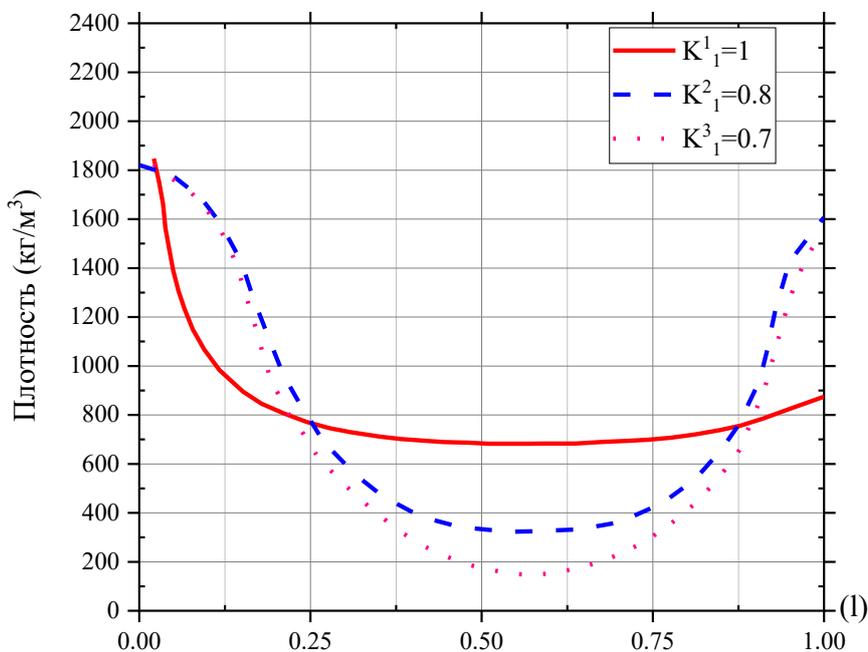


Рис. 6. Изменение плотности при различном индексе перфорации поверхностей

В соответствии с зависимостями изменения плотности строятся зависимости изменения прочности по толщине изделия.

Рисунок 6 может наглядно охарактеризовать изменение плотности в образце при вертикальном способе загрузки пенобетонной смеси при

условии различного индекса перфорации противоположных стенок формы.

На рисунке 7 представлено изменение прочности по одному из сечений материала. Несимметричность зависимостей связана с особенно-

стями формирования изделия. Графики представлены для изделий, отформованных по пеногазотехнологии со следующими коэффициентами заполнения формы: $K_1^1 = 1$; $K_1^2 = 0,8$; $K_1^3 = 0,7$.

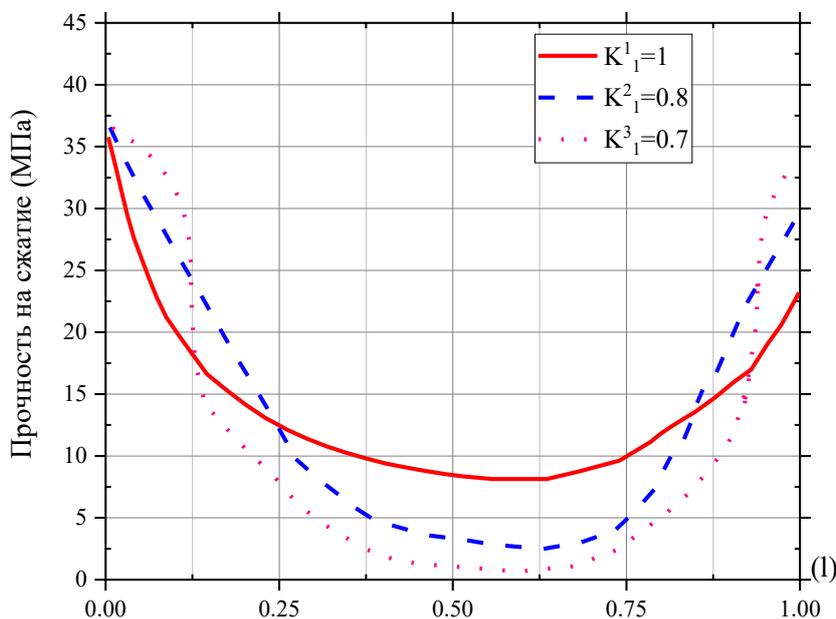


Рис. 7. Зависимость изменения прочности материала для различной степени заполнения формы с перфорированными вертикальными поверхностями

Из полученных зависимостей видно, что при повышении давления в системе плотность внешних слоёв не изменяется, а увеличивается плотность центральной части изделия, отвечающей за теплопроводность. То есть теплоизоляционные свойства материала ухудшаются, повышается

теплопроводность материала. Более наглядно соотношение различных значений плотностей в материале можно проиллюстрировать на рисунках 8, 9 и 10 представленных для значений плотностей в изделии с коэффициентами заполнения 1; 0.8 и 0.7 соответственно.

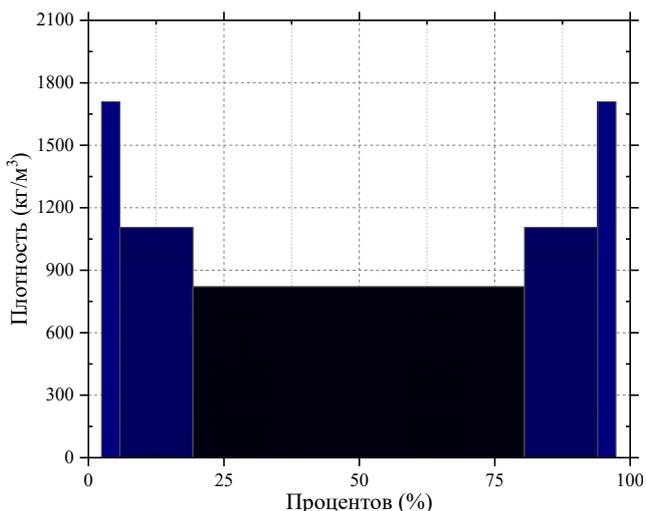


Рис. 8. Диаграмма распределения плотностей при коэффициенте заполнения формы $K_1^1 = 1$

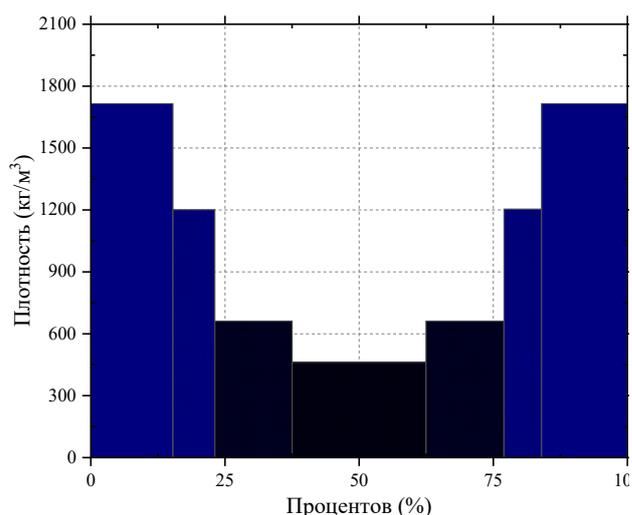


Рис. 9. Диаграмма распределения плотностей при коэффициенте заполнения формы $K_1^2 = 0,8$

Проанализировав имеющиеся диаграммы, можно сказать, что наилучшее соотношение

между плотной коркой и хорошими теплоизоляционными свойствами центра обладает изделие, полученное при коэффициенте заполнения

формы равном 0.7. При $K_1=1$ образец обладает более значительной конструкционной прочно-

стью и может использоваться в качестве облегченного конструкционного материала в малоэтажном строительстве.

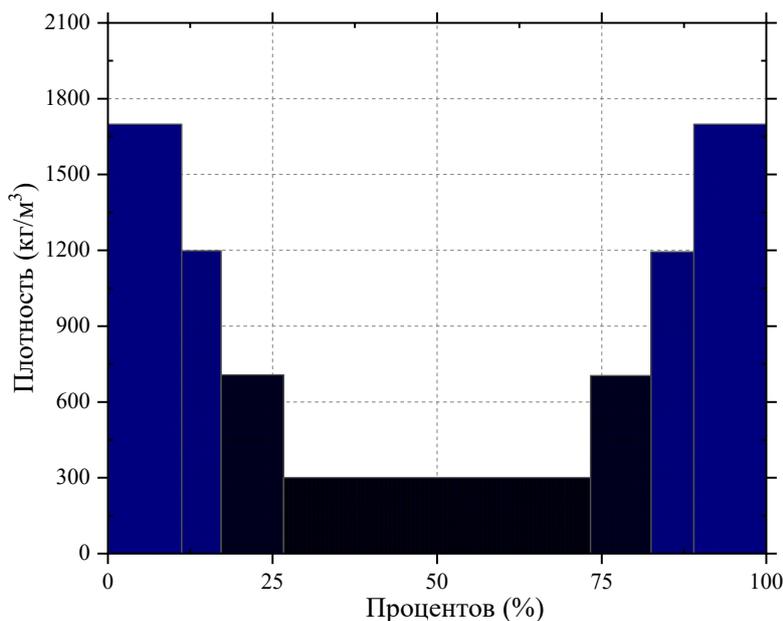


Рис. 10. Диаграмма распределения плотностей при коэффициенте заполнения формы $K_1^3=0,7$

Выводы. Полученные результаты и представленные закономерности говорят о возможности регулирования коэффициента вариатропности для ячеистых бетонов, которые зависят так же от коэффициента заполнения формы. С увеличением значения K_3 степень вариатропности увеличивается в 1,5 раза, что обеспечивает регулируемое повышение эксплуатационной нагрузки строительных изделий с вариатропной ячеистой структурой по сравнению с ячеистыми бетонами монотропной структуры при одинаковой материалоемкости изделия. Изменения значения площади перфорации, количества и типа отверстий перфорации поверхности формы позволит получать регулируемо дифференцированную вариатропность ячеистых изделий.

Изделия на основе ячеистого бетона с изменяющейся плотностью от периферии обладают достаточно хорошими теплоизоляционными свойствами за счёт низкой плотности в срединных слоях, при этом удовлетворяют всем требуемым показателями по прочности, твёрдости и морозостойкости благодаря высокой плотности поверхностного слоя. При этом отсутствие резкой границы предотвращает появление зоны контракционных напряжений и накопления конденсата.

Материалы исследования используются для оформления заявки на интеллектуальную собственность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kim D.V., Cong L.N., Van L.T., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic- mineral additives // Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1425. Pp. 1–12.
2. Fomina E.V., Strokova V.V., Kozhukhova N.I. Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete // World Applied Sciences Journal. 2013. №25(1). Pp. 48–54.
3. Chica L., Alzate A. Cellular concrete review: new trends for application in construction // Construction and Building Materials. 2019. №200. Pp. 637–647.
4. Besbes E., Jury V., Monteau J.Y., Le B. A. Characterizing the cellular structure of bread crumb and crust as affected by heating rate using X-ray microtomography // Journal of Food Engineering. 2013. №115(3). Pp. 415–423.
5. Булавин В. А. Газобетон для монолитных ограждающих конструкций с вариатропной поровой структурой: диссертация. Ростов-на-Дону 2003. 145 с.
6. Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я., Шаимов М.Х., Кузьменко С.А. Способ изготовления вариатропных ячеистобетонных изделий. Патент RU 2243190 С1. 27.12.2004. 5 с
7. Чернов А.Н. Вариатропный ячеистый бетон переменной плотности // Бетон и железобетон. 1982. №03. С 26–29.
8. Большаков В.И., Мартынеко В. А. Вариатропный ячеистый бетон // Строительные материалы и изделия. 2002. №9. 3 с.

9. Кара К.А., Шорстов Р.А. Приемы создания газобетона с вариатропной структурой // Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 23–28.

10. Miryuk O. Formation of structure magnesium foamed concrete // International Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 6, Issue 2. Pp. 1–10.

11. Коротышевский О.В., Шкуридин В.Г. Способ приготовления поризованной строительной смеси и устройство для его осуществления (варианты). Патент РФ №2081099 С1. (1997). 19 с.

12. Бруяко М.Г., Ушков В.А., Горосян Д.В., Григорьева АИ., Волов АД., Ергенян А.М., Творогова Е.А. Способ изготовления вариатропного ячеистого бетона. Патент RU 2626092 С1. 21.07.2017. 6 с.

13. Шорстов Р.А., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Технологии получения многослойных конструкций вариатропной структуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №4. С. 32–39. DOI: 10.34031/article_5cb1e65fe51130.63177531.

14. Richard C., Bruno F., Anne-lise B., He'le'ne D., Sophie O. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity // Construction and Building Materials. 2006. № 20. С. 286–295.

15. Olga M. Liquid-glass concrete of variable density // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 869. 2020. 032025. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/869/3/032025

16. Казанцева Л.К. Формирование ячеистой структуры и технология пеноматериалов из цеолитсодержащего сырья: диссертация. Томск 2002. 262 p.

17. Narayanan N., Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: A review // Cement and Concrete Composites. 2000. №22(5). Pp. 321–329.

18. Ramamurthy K., Kunhanandan N.E.K., Indu S.R.G. A classification of studies on properties of foam concrete // Cement and Concrete Composites. 2009. №31(6). Pp. 388–396.

19. ГОСТ 23499-2009. Материалы и изделия звукоизоляционные и звукопоглощающие строительные. Общие технические условия ГОСТ от 10 ноября 2010 г. № 23499–2009. 35 с

Информация об авторах

Бруяко Михаил Герасимович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительного материаловедения». E-mail: mbruyako@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Баженова Софья Ильдаровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительного материаловедения». E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Ву Ким Зиен, аспирант кафедры «Строительного материаловедения». E-mail: kimdienxdtb@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 16.01.2022 г.

© Бруяко М.Г., Баженова С.И., Ву Ким Зиен, 2022

Bruyako M.G., *Bazhenova S.I., Vu Kim Dien

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com*

CELLULAR CONCRETES WITH AN VARIATROPIC STRUCTURE AT THE PRODUCT FORMING STAGE

Abstract. The paper presents a one-stage method of development results to obtaining effective structural and thermal insulation products based on cellular concrete with variatropic structure and the study of their properties. In addition, the paper presents the study's results on determining the influence of initial components quantitative ratio of the foam-aerated concrete mixture and technological regimes. For this purpose, a model system $[Ca(OH)_2; Al; H_2O; NaF]$ has been created. The effect of the foam-aerated concrete mixture's form filling ratio ($1.0 \div 0.7$) and the perforation index of the form walls on the formation and properties of cellular concrete with a variatropic structure is studied. Influence of variatropic structure of cellular concretes on strength characteristics of products based on them is studied. It is confirmed that products based on cellular concrete with variable density from the periphery have sufficiently good thermal insulation properties due to the low density in the central zone. Concurrently, it meets all the required

indicators of strength, hardness and erosion resistance due to the high density of the surface layer. At the same time, the absence of a sharp boundary prevents the zone appearance of contractive stresses and condensate accumulation. The experimental results confirm the possibility of obtaining products based on variatropic cellular concrete with the specified properties and producing building products and structural elements with higher strength indicators than similar products based on monotonic cellular concrete while maintaining material intensity.

Keywords: Cellular concrete, variable structures, aerated concrete, foam concrete, perforated mold.

REFERENCES

1. Kim D.V., Cong L.N., Van L.T., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic- mineral additives. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. No. 1425. Pp. 1–12.
2. Fomina E.V., Strokova V.V., Kozhukhova N.I.: Application of natural aluminosilicates in autoclave cellular concrete. *World Applied Sciences Journal*. 2013. No. 25(1). Pp. 48–54.
3. Chica L., Alzate A. Cellular concrete review: new trends for application in construction. *Construction and Building Materials*. 2019. 200. Pp. 637–647.
4. Besbes E., Jury V., Monteau J.Y., Le Bail A.: Characterizing the cellular structure of bread crumb and crust as affected by heating rate using X-ray microtomography. *Journal of Food Engineering*. 2013. No. 115(3). Pp. 415–423.
5. Bulavin V.A. Aerated concrete for monolithic enclosing structures with a variotropic porous structure: dissertation [Gazobeton dlya monolitnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy s variotropnoy porovoy strukturoy]. Rostov-on-Don 2003. 145 p. (rus)
6. Korolev A.S., Voloshin E.A., Trofimov B.Ya., Shaimov M.Kh., Kuzmenko S.A. Method for manufacturing variotropic cellular concrete products [posob izgotovleniya variotropnykh yacheistobetonnykh izdeliy]. Patent RU 2243190 C1. 12/27/2004. 5p. (rus)
7. Chernov A.N. Variotropic cellular concrete of variable density [Variotropnyy yacheisty beton premennoy plotnosti]. *Concrete and reinforced concrete*. 1982. No. 03. Pp. 26–29. (rus)
8. Bolshakov V.I., Martynenko V.A. Variotropic cellular concrete [Variotropnyy yacheisty beton]. *Building materials and products*. 2002. No. 9. 3 p. (rus)
9. Kara K.A., Shorstov R.A. Techniques for creating aerated concrete with a variotropic structure [Priyemy sozdaniya gazobetona s variotropnoy strukturoy] Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Pp. 23–28. (rus)
10. Miryuk O. Formation of structure magnesium foamed concrete. *International Journal of Civil Engineering*. Feb - Mar 2017. Vol. 6, Issue 2. Pp. 1–10.
11. Bruyako M.G., Ushkov V.A., Torosyan D.V., Grigor'eva A.I., Volov A.D., Ergenyan A. M and Tvorogova E.A. Method for making variotropic cellular concrete [Sposob izgotovleniya variotropnogo yacheistogo betona]. Patent RU 2626092 C1. 21.07.2017. 6 p. (rus)
12. Shorstov R.A., Suleimanova L.A., Kara K.A. Technologies for obtaining multilayer structures of a variotropic structure [Tekhnologii polucheniya mnogoslonykh konstruktsiy variotropnoy struktury]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 4. Pp. 32–39. DOI: 10.34031/article_5cb1e65fe51130.63177531. (rus)
13. Richard C., Bruno F., Anne-lise B., He'le'ne D., Sophie O. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. *Construction and Building Materials*. 2006. No. 20. Pp. 286–295.
14. Olga M. Liquid-glass concrete of variable density. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 869. 2020. 032025. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/869/3/032025.
15. Kazantseva L.K. Formation of a cellular structure and technology of foam materials from zeolite-containing raw materials [Formirovaniye yacheistoy struktury i tekhnologiya penomaterialov iz tseolitsoderzhashchego syr'ya]: dissertation. Tomsk 2002. 262p. (rus)
16. Narayanan N., Ramamurthy K.: Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2000. No. 22(5). Pp. 321–329.
17. Ramamurthy K., Kunhanandan N.E.K., Indu S.R.G. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009. No. 31(6)/ Pp. 388–396.
18. GOST 23499-2009. Sound-proof and sound-absorbing building materials and products [Materialy i izdeliya zvukoizolyatsionnyye i zvukopogloshchayushchiye stroitel'nyye]. General technical conditions GOST dated November 10, 2010 No. 23499-2009. 35p. (rus)

Information about the authors

Bruyako, Mikhail G. PhD, Associate Professor of Department of Building Materials Science. E-mail: mbruyako@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Bazhenova, Sofya I. PhD, Associate Professor of Department of Building Materials Science. E-mail: sofia.bazhenova@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Vu Kim Dien. Postgraduate student, Department of Building Materials Science. E-mail: kimdienxdtb@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, st. Yaroslavskoe Shosse, 26.

Received 16.01.2022

Для цитирования:

Бруяко М.Г., Баженова С.И., Ву Ким Зиен. Ячеистые бетоны с вариатропной структурой на стадии формования изделия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-8-18

For citation:

Bruyako M.G., Bazhenova S.I., Vu Kim Dien. Cellular concretes with an variatropic structure at the product forming stage. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-8-18

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-19-30

Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., *Сумской Д.А., Аль Мамури Саад Кхалил Шадид
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: pr9nik2011@yandex.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА И ОТХОДОВ БОЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

Аннотация. При разработке композиционных вяжущих определенного функционального назначения необходимо рационально подбирать сырьевые материалы с учетом их химического, минерального и гранулометрического составов. Большое значение на создание вяжущих композиций влияет использование механоактивации с выбором наиболее подходящего помольного агрегата, значительное влияние на свойства композиционных вяжущих оказывает применяемые функциональные добавки.

В статье приведены результаты получения вяжущих композиций оптимального состава на основе портландцемента и боя керамического кирпича. Выполнены экспериментальные исследования гранулометрического состава, приведены результаты испытаний вяжущих композиций составов: цемент – бой керамического кирпича, приготовленных в мельнице. Разработаны и установлены составы вяжущих композиций с широким спектром использования отходов керамического боя – отходов кирпичного производства.

С помощью метода электронной микроскопии изучены особенности микроструктуры сколов цементных камней, синтезированных на основе портландцемента и различного содержания минерального наполнителя – отходов боя керамического кирпича, механоактивизированных в вибрационной мельнице. Замечено, что открытые поры сколов цементных камней, синтезированных вяжущих, густо заросли различными новообразованиями различных размеров.

Установлено, что микроструктура гидратированных вяжущих композиций отмечается плотным строением вследствие применения порошкообразного кирпичного боя, который уплотняет структуру композита, а также отмечается, что на минеральных частицах наполнителя прорастают зерна гидросиликатов кальция, уплотняя общую структуру композита.

Ключевые слова: вяжущая композиция, отходы боя керамического кирпича, портландцемент, минеральный наполнитель.

Введение. В современных условиях значительное распространение имеют вяжущие композиции, наполненные различными минеральными наполнителями разного генезиса. Вяжущие композиции получают путем механохимической активации в определенных условиях вяжущих (портландцемента, гипса, извести) с различными активными и неактивными минеральными добавками. Практика показала, что использование минеральных добавок позволяет экономить дорогостоящую клинкерную составляющую портландцемента, при этом обеспечивая требуемые физико-механические показатели создаваемых композитов. Многочисленными исследованиями установлена рациональность и целесообразность применения различных природных и техногенных материалов в качестве минеральных добавок: техногенные пески различного происхождения, хвосты мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов, шламы бокситового производства, золы, шлаки топливного и металлургического происхождения, отходы перлитового производства и т.д. [1–5].

В работе [6] было отмечено, что при производстве вяжущего с применением минеральной

добавки, должны предъявляться более жесткие требования.

Получены водостойкие, не клинкерные композитные гипсовые вяжущие (КГВ). Высокие их физико-технические свойства поддерживаются формированием усиленной структуры искусственного камня, обусловленной введением комплексной гидромеханической добавки, содержащей измельченный доменный шлак, пластификатор, известь, пыль молотую керамзитовую [7].

В работе [8] приведены результаты исследований влияния количества и разной дисперсности добавок керамзитовой пыли различного вещественного состава на свойства теста и искусственного камня на основе строительного гипса, в том числе керамзитовой пыли с добавкой извести, керамзитовой пыли в комплексе с добавками извести и суперпластификатора, а также бинарной добавки, включающей керамзитовую пыль и гранулированные доменные шлаки различной основности, в комплексе с добавками извести и суперпластификатора.

Взаимодействие минеральных вяжущих веществ с наполнителями осуществляется в области контакта частиц этих компонентов. Наименьшее количество добавки приведет к сокращению

эффективности их действия. При большом ее содержании вероятны непосредственные контакты между частицами добавки, что снизит эффективность ее влияния [9-10].

В настоящее время строительный комплекс активно развивается. В современных условиях необходимо разрабатывать новейшие строительные материалы с требуемыми физико-механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами, а для разработки таких материалов требуется создание новых экологически чистых недорогих технологий. Кроме того, особым требованием является рациональное использование природного и техногенного сырья, оно связано с природными и техногенными минеральными добавками.

К настоящему времени накоплен определенный научный опыт по управлению структурообразованием различных цементных бетонов, приготовленных с использованием разных минеральных добавок. Все минеральные добавки имеют различный генезис, отличный химический, минеральный, гранулометрический составы, что определенным образом влияет на процессы структурообразования в создаваемом композите, формируют цементный камень с различными показателями пористости, плотности и прочности.

Минеральные добавки в зависимости от их удельной поверхности, влияния на создаваемую структуру и физико-механические свойства цемента условно можно классифицировать на две группы: разбавители и уплотнители. Минеральные добавки – разбавители как бы разбавляют цементный порошок, имеют удельную поверхность 0,2–0,5 м²/г, примером минеральной добавки – разбавителя является зола. Минеральные добавки-уплотнители способствуют уплотнению цементной матрицы, имеют удельную поверхность 20–30 м²/г, что составляет в 100 раз меньше зерен цемента. Примером этой добавки является микрокремнезем. Зерна этой добавки эффективно заполняют пористое пространство между формирующейся структурой цементного камня. Кроме того, эти добавки, имея повышенную реакционную способность, увеличивают прочностные показатели композита [11–13].

Учитывая, что минеральные добавки разделяются на активные и неактивные, следует учитывать эти особенности и применять при создании сырьевых композитов. Особое внимание уделяется активным добавкам, так как они могут при наличии воды взаимодействовать с Ca(OH)₂ в нормальных условиях, формируя соединения, обладающие вяжущими свойствами. Многие активные добавки в частности тонкоизмельченный до-

менный шлак обладает свойством самостоятельной гидратации при некотором добавлении извести. Известно, что большое влияние при использовании минеральных добавок оказывает их тонина помола, зерновой состав, а также генезис.

Для рационального использования природных добавок (трассы, пеплы, туфы) следует подвергать их тонкому измельчению, в этом случае проявляется их максимальная активность, что позволяет значительно повысить физико-механические показатели цементным композитам при обеспечении низких показателей по водопоглощению и морозостойкости.

Следует отметить, что бетоны, приготовленные с применением тонкомолотых минеральных добавок, обладают достаточно высокой текучестью, что предотвращает возможное расслоение бетонных смесей.

В последние годы большую популярность завоевала добавка – микрокремнезем, несмотря на то, что имеет высокую стоимость и недостаточно распространена. Альтернативным материалом названной добавки могут служить добавки вулканического происхождения, они имеют в своем составе до 75-85 % стеклофазы, которая обеспечивает их пуццоланическую активность. Находясь в порах формирующегося цементного камня, они эффективно уплотняют его структуру, а также значительно снижают расход используемого цементного вяжущего.

Среди добавок техногенного происхождения определенный интерес представляют отходы производства керамического кирпича. Кроме того, вследствие реновации строительного комплекса страны возникает значительное количество отходов боя керамического кирпича при разборе старых отслуживших свой срок зданий и сооружений. Возникает проблема их утилизации.

В связи с изложенным проведены исследования по возможности использования отходов боя керамического кирпича при получении вяжущих композиций для строительства [14–17].

На основании изучения отходов перлитового производства и возможности их применения в вяжущих композициях было установлено, что их использование в этих вяжущих позволяет получить эффективные растворы, которые обеспечивают высокие теплозащитные свойства. При этом использование их в количестве 5–10 % и последующая механоактивация в шаровой или вибрационных мельницах показали возможность повышения теплоизоляционных свойств и обеспечения требуемой прочности в полученных вяжущих композициях [18, 19].

Материалы и методы. При изготовлении вяжущих композиций в настоящей работе применяли портландцемент ПЦ 500-Д0-Н (ГОСТ

10178-85, ГОСТ 30515-2013) ЗАО «Белгородский цемент» и отходы производства керамического кирпича. Составы исследуемых смесей №2 – №4 и №6 – №8 готовили помолом в вибрационной мельнице в течение 10 и 20 минут с различной дозировкой отходов боя керамического кирпича: 10; 20; 30 %.

Основная часть. Вяжущую композицию получали в вибрационной мельнице. Применение этой мельницы позволило получить эффективные композиционные вяжущие с заданными свойствами.

Вибрационные мельницы хорошо себя зарекомендовали для тонкого измельчения различных материалов: огнеупорной глины, кокса, угля, шамотного кирпича, кварцевого песка и других материалов природного и техногенного проис-

хождения. Особенностью вибрационных мельниц является то, что в них материал разрушается вследствие ударного, и последующего истирающего действия мелющих тел, при таком помоле резко происходит активизация процессов, в результате которых создаются условия для высокой однородности степени помола.

Вибрационная мельница (рис. 1) включает станину 1, на которую установлена камера помола 3 посредством пружинных опор 2. Установка приводится в действие от электродвигателя посредством упругой муфты 6 к основному валу 5, связанному с вибровозбудителем. Вибровозбудитель состоит из основного вала с установленными на нем дебалансными дисками. Общий вид вибрационной мельницы приведен на рисунке 1 [20].

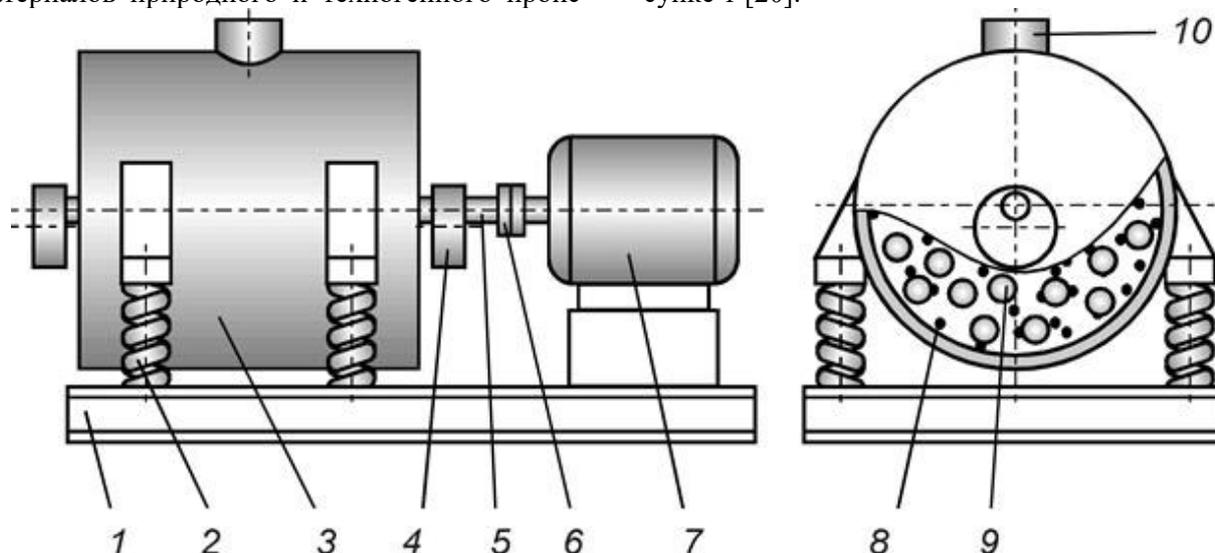


Рис. 1. Общий вид вибрационной установки

Камера помола 3 состоит из полого стального цилиндра, который является рабочим корпусом мельницы, футерованным изнутри листовой сталью, где осуществляется процесс помола в присутствии измельчаемого материала и мелющих тел. В вибрационной установке имеется загрузочное отверстие 10, которое, как правило, устраивается в верхней части помольной камеры. Разгрузку помольной камеры осуществляют через нижнее разгрузочное отверстие, которое снабжено колосниковой решеткой. Через колосниковую решетку разгружается измельченный материал, а мелющие тела остаются в рабочей камере. Люки загрузочных и разгрузочных отверстий снабжены запорными дверцами с надежным резиновым уплотнением.

Достоинства вибрационных мельниц:

- создание высокодисперсного помола при незначительной продолжительности помола;
- реализация помола сырьевых материалов в сухом и водном режимах;
- компактность установки;

- незначительная энергоемкость;
- возможность осуществления сверхтонкого помола при отсутствии сепаратора;
- работа с установкой не требует специальной подготовки;
- оперативное регулирование помола материала за счет регулирования дебалансного момента вращения.

На начальном этапе подбирали различные составы вяжущих композиций на сырьевых материалах: портландцемент, отходы боя керамического кирпича с изменением их содержания.

На следующем этапе получали вяжущие композиции, включающие портландцемент и различные дозировки отходов производства – боя керамического кирпича в вибрационной мельнице.

Цель работы: установление наилучших физико-механических показателей получаемых вяжущих композиций в вибрационной мельнице.

Результаты испытаний вяжущих композиций приведены в таблице 1.

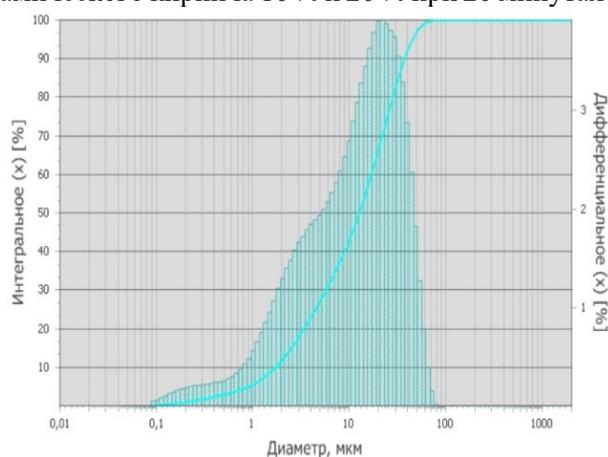
Таблица 1

Результаты испытаний вяжущих композиций составов: цемент-отходы боя керамического кирпича, приготовленных в вибрационной мельнице

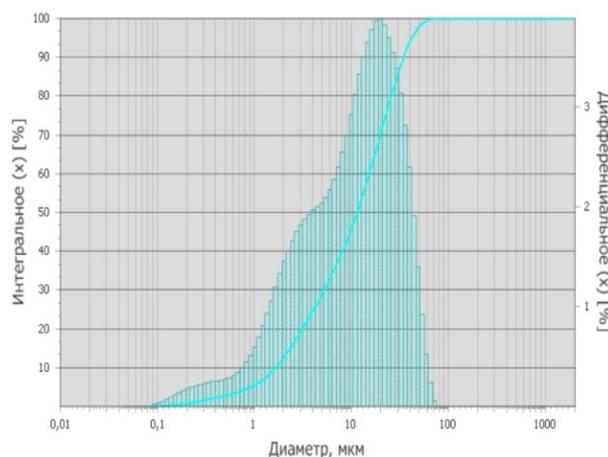
№ составов п/п	Шифр	Составы	НГ, %	Сроки схватывания, мин		R _{сж} , МПа	
				начало	конец	2 сут	28 сут
Время механоактивации - 10 минут							
1	ВЦ 1	Ц=100%	28,75	130	170	22,45	59,07
2	ВЦБК 1.1	Ц/БК=90/10%	31,94	143	181	31,12	81,90
3	ВЦБК 2.1	Ц/БК=80/20%	35,31	154	192	27,32	71,90
4	ВЦБК 3.1	Ц/БК=70/30%	41,78	160	201	24,96	65,68
Время механоактивации - 20 минут							
5	ВЦ 2	Ц=100%	31,66	165	203	25,42	66,90
6	ВЦБК 1.2	Ц/БК=90/10%	33,05	171	215	37,26	98,05
7	ВЦБК 2.2	Ц/БК=80/20%	36,56	180	222	31,47	82,84
8	ВЦБК 3.2	Ц/БК=70/30%	42,85	189	231	28,98	76,26

Гранулометрический состав вяжущих композиций с наилучшими показателями прочности составы №6 и №7 (с содержанием отходов боя керамического кирпича 10 % и 20 % при 20 минутах

помола) исследовали с помощью прибора AnalyssetteNanoTecplus (рис. 2), удельная поверхность в среднем составляла 18250 см²/см³.



ВЦБК 1.2



ВЦБК 2.2

Рис. 2. Гранулометрический состав вяжущих композиций (№6 и №7): цемент/отходы боя керамического кирпича: 90 %/10 %; 80 %/20 %, активированных в вибрационной мельнице в течение 20 минут

Анализ результатов по изучению нормальной плотности вяжущих композиций показал, что при использовании 10 % боя керамического кирпича НГ возросла примерно на 7,75 %, а при введении до 20 % – до 20,10%, а при 30 % – до 40,44 %, увеличение НГ объясняется значительной удельной поверхностью минеральной добавки, а также защемлением воды между зернами и в зернах заполнителя.

Следует отметить, что при использовании тонкомолотых минеральных наполнителей от 20 до 30 % повышается прочность вяжущих композиций, что обеспечивается уплотнением структуры за счет присутствия минерального наполнителя, на котором как на подложках формируются кристаллы гидросиликатов кальция (рис. 3).

Рассматривая сроки схватывания вяжущих композиций в сравнении с портландцементом, необходимо отметить, что с увеличением количества минерального наполнителя происходит увеличение как начала, так и конца схватывания. При активации в течение 10 минут, увеличение начала сроков схватывания вяжущих композиций варьируется от 10,00 до 23,07 %. За время активации 20 минут сроки начала схватывания возрастают от 3,63 до 14,55 %, при этом конец схватывания увеличивается от 5,09 до 13,79 %. Увеличение сроков схватывания начала и конца можно объяснить увеличенным количеством минерального наполнителя, который на этом этапе затормаживает начальные процессы гидратации [19–20].

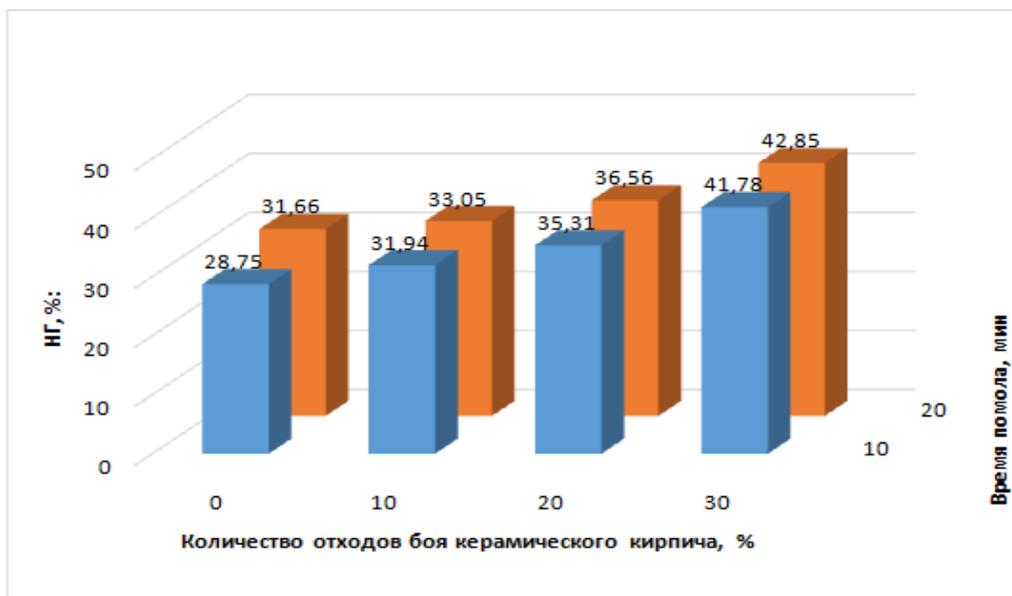


Рис. 3. Нормальная густота вяжущих композиций (составов №1-№8) с различным содержанием отходов боя керамического кирпича, активированных в течение 10 и 20 минут в вибрационной мельнице

Наибольший показатель прочности имеет вяжущая композиция с содержанием 10 % отходов боя керамического кирпича с продолжительностью механоактивации в течение 20 минут, что составляет 98,05 МПа, данный показатель превосходит результаты прочности товарного цемента на 46,56 %. При использовании тонкомолотых керамических отходов в количестве 20 %

прочность при сжатии вяжущей композиции возрастает до 82,84 МПа, что составляет увеличение на 23,83 % в сравнении с товарным цементом.

При использовании 30 % отходов боя керамического кирпича с механоактивацией 10 и 20 минут обеспечивается прочность, которая выше товарного цемента, соответственно, на 11,19 и 14,00 % (рис. 4).



Рис. 4. Результаты физико-механических испытаний вяжущих композиций различным содержанием отходов производства керамического кирпича, активированных в течение 10 и 20 минут в вибрационной мельнице

На основании проведенных экспериментов установлено, что наивысшей прочностью обладает вяжущая композиция с содержанием отходов боя керамического кирпича в количестве 10 %, измельченная в вибрационной мельнице в течение 20 мин. Представляют интерес составы с содержанием добавки 20 и 30 %, измельченные в

течение 10 минут и характеризующиеся прочностями 81,90 МПа и 71,90 МПа, что превышает прочности товарного цемента в 1,8 раза и в 1,5 раза, соответственно.

Проведенный минеральный анализ отходов боя керамического кирпича показал (рис. 5), что в наибольшем количестве присутствуют минералы: кварца SiO₂; гиббсита Al₂O₃·3H₂O.

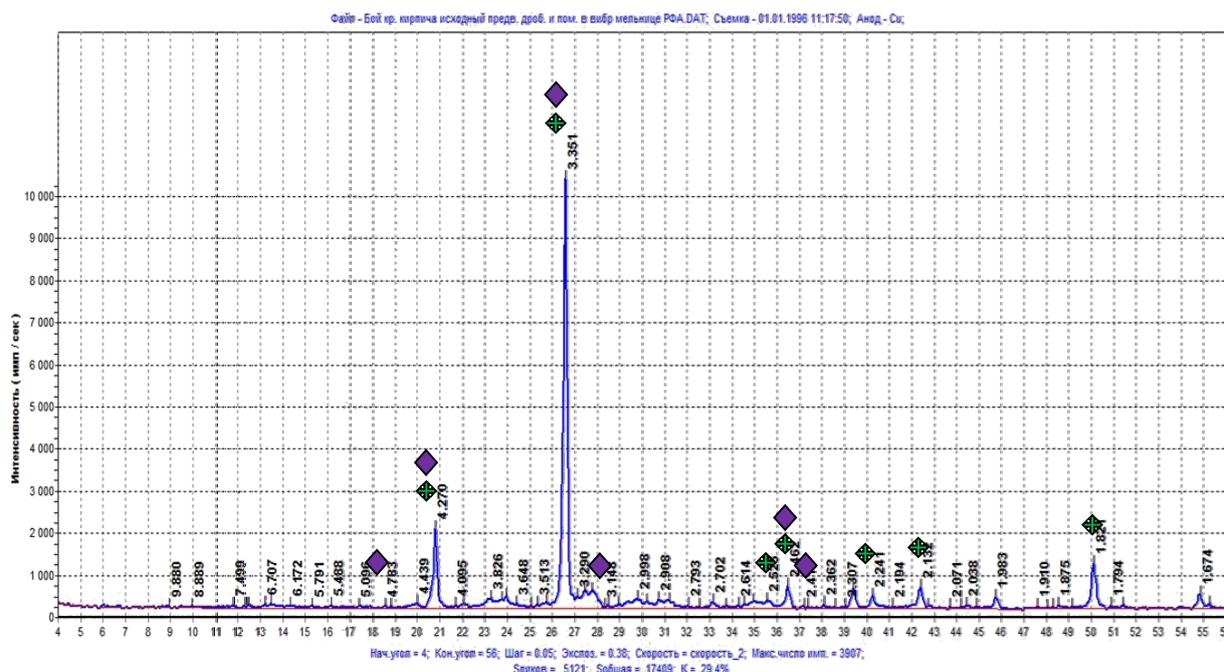


Рис. 5. Дифрактограмма исходного боя керамического кирпича

◆—SiO₂; ◆—Al₂O₃·3H₂O

Анализ дифрактограмм гидратированных вяжущих композиций в возрасте 28 суток (рис. б), полученных с использованием отходов боя керамического кирпича показал, что в цементном камне наряду с минералами присущими гидратированному портландцементному клинкеру: портландиту – CaOH₂, гидросиликатов кальция CSH,

присутствуют минералы, внесенные боем керамического кирпича: SiO₂ и Al₂O₃, тем самым повышать гидравлическую активность системы и в конечном счете оказывать положительное влияние на увеличение прочности цементного камня.

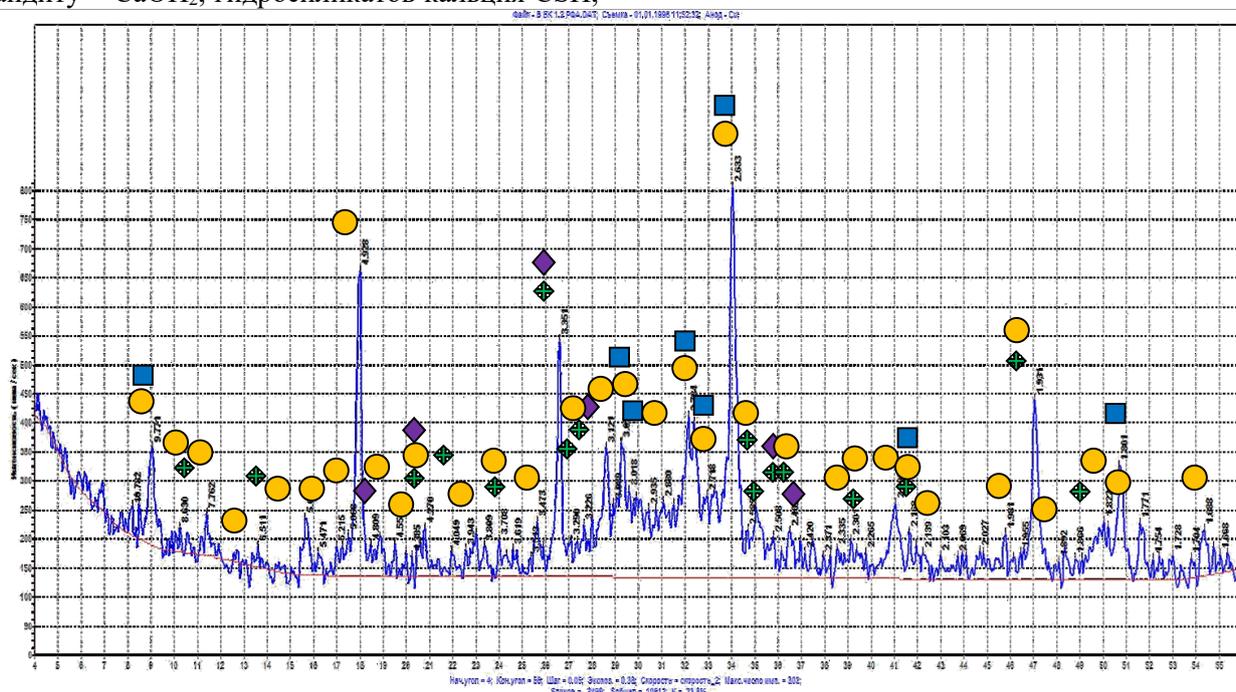


Рис. 6. Дифрактограмма гидратированного портландцемента с содержанием 10 % боя керамического кирпича, 20 мин помола в вибрационной мельнице

◆—SiO₂; ◆—Al₂O₃·3H₂O; ●—Ca(OH)₂; ▲—CSH(II)

Для изучения особенностей твердения композиционных вяжущих с использованием мине-

ральной добавки на первом этапе была исследована микроструктура тонкоизмельченного боя керамического кирпича (рис. 7).

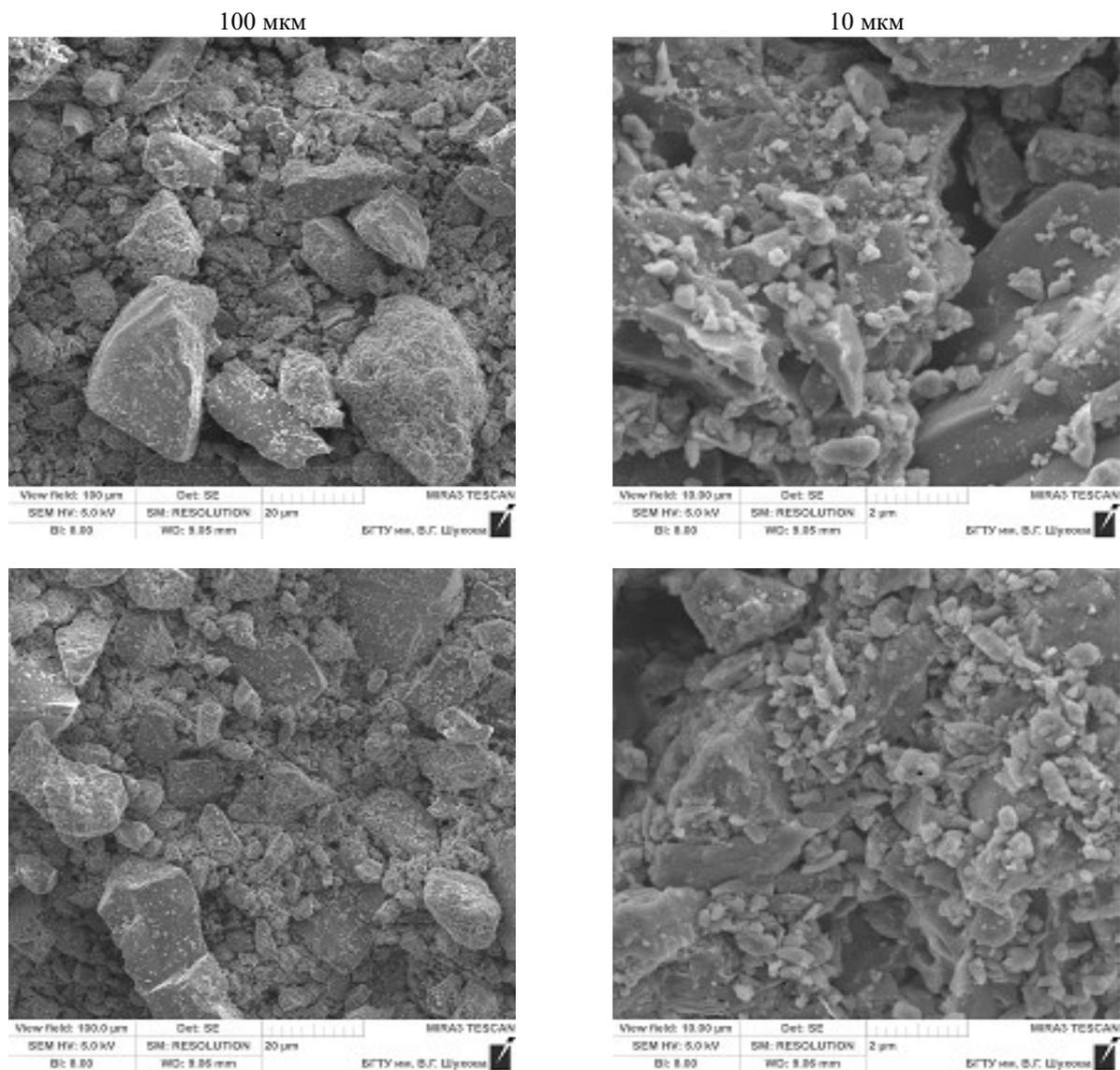


Рис. 7. Микроструктура образцов отходов производства керамического кирпича (измельченных в вибрационной мельнице)

Изучение микроструктуры вяжущих композиций показало, что образцы, изготовленные на основе портландцемента и различного содержания отходов боя керамического кирпича имеют свои незначительные особенности. В образцах с содержанием 10 % отходов боя керамического кирпича (рис. 8) отмечается более слитная структура, присутствует очень незначительное количество пор. Отчетливо видно плотное формирование контактной зоны на границе частиц отходов боя керамического кирпича и формирующихся кристаллогидратов кальция. Кристаллическая структура пронизывает весь конгломерат, хорошо видны участки заросших пор. Микрофотографии свидетельствуют о том, что процессы формирования гидросиликатов и гидроалюминатов продолжаются, что предопределяет дальнейшее нарастание прочности и стабильности композита. Данные микроскопических исследований

подтверждаются результатами физико-механических испытаний образцов (таб. 1, рис. 8).

Определенный интерес представляет микроструктура образцов композиционных вяжущих составов портландцемент и 20 % отходов боя керамического кирпича активированных в вибрационной мельнице (рис. 9). На микрофотографии отчетливо видно прорастание гидросиликатов и гидроалюминатов кальция по всему объему композита, что свидетельствует о формировании достаточно высокой прочности. На представленном участке микрофотографии отчетливо видна трещина, прошедшая по минеральному наполнителю, свидетельствующая о формировании плотной структуры полученного композита, обладающего высокой прочностью 82,84 МПа, отраженной в таблице 1.

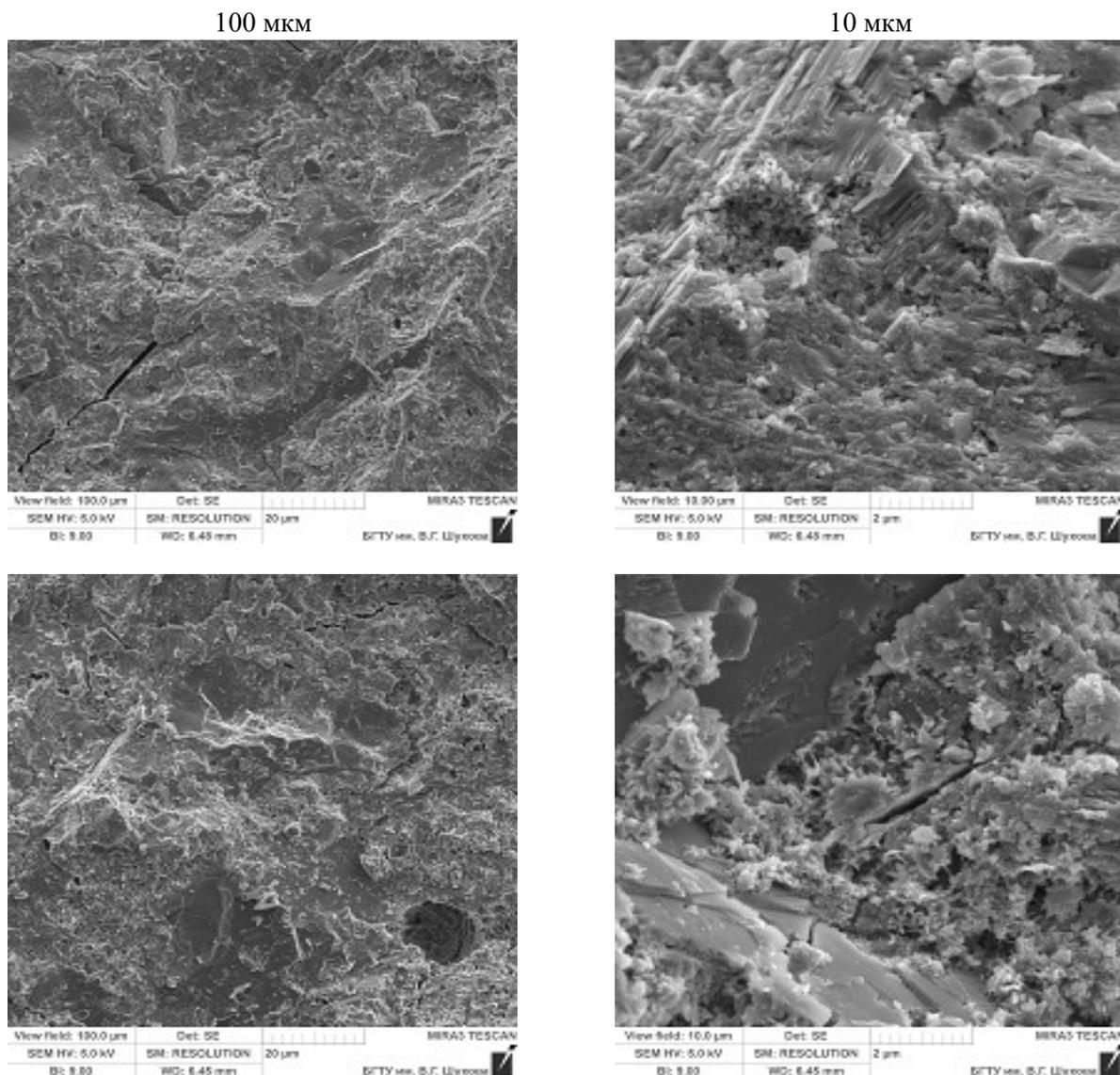


Рис. 8. Микроструктура образцов вяжущей композиции № 6: цемент/отходы боя керамического кирпича=90 %/10 % при 20 минутах активации в вибрационной мельнице

Отмечается, что по объёму композита просматриваются мелкодисперсные кристаллы гидросиликатов кальция и алюминия, что свидетельствует о последующей гидратации и нарастании прочности.

Выводы. Анализ результатов по изучению нормальной плотности вяжущих композиций показал, что при использовании 10 % тонкомолотых отходов керамического кирпича НГ возросла примерно на 7,75 %, а при введении до 20 % – до 20,10 %, а при 30 % – до 40,44 %, увеличение НГ объясняется значительной удельной поверхностью минеральной добавки, а также заземлением воды между зёрнами и в зёрнах заполнителя.

Установлено, что наивысшей прочностью обладает вяжущая композиция с содержанием отходов керамического кирпича в количестве 10 % и измельченная в вибрационной мельнице в

течении 20 мин. Представляют интерес составы с содержанием добавки 20 и 30 %, измельченные в течение 10 минут и характеризующиеся прочностями 81,90 МПа и 71,90 МПа, что превышает прочности товарного цемента в 1,8 раза и в 1,5 раза, соответственно.

В образцах с содержанием 10 % отходов боя керамического кирпича отмечается более слитная структура, присутствует очень незначительное количество пор. Отчетливо видно плотное формирование контактной зоны на границе частиц отходов боя керамического кирпича и формирующихся кристаллогидратов кальция. Микрофотографии свидетельствуют о том, что процессы формирования гидросиликатов и гидроалюминатов продолжают, что предопределяет дальнейшее нарастание прочности и стабильности композита.

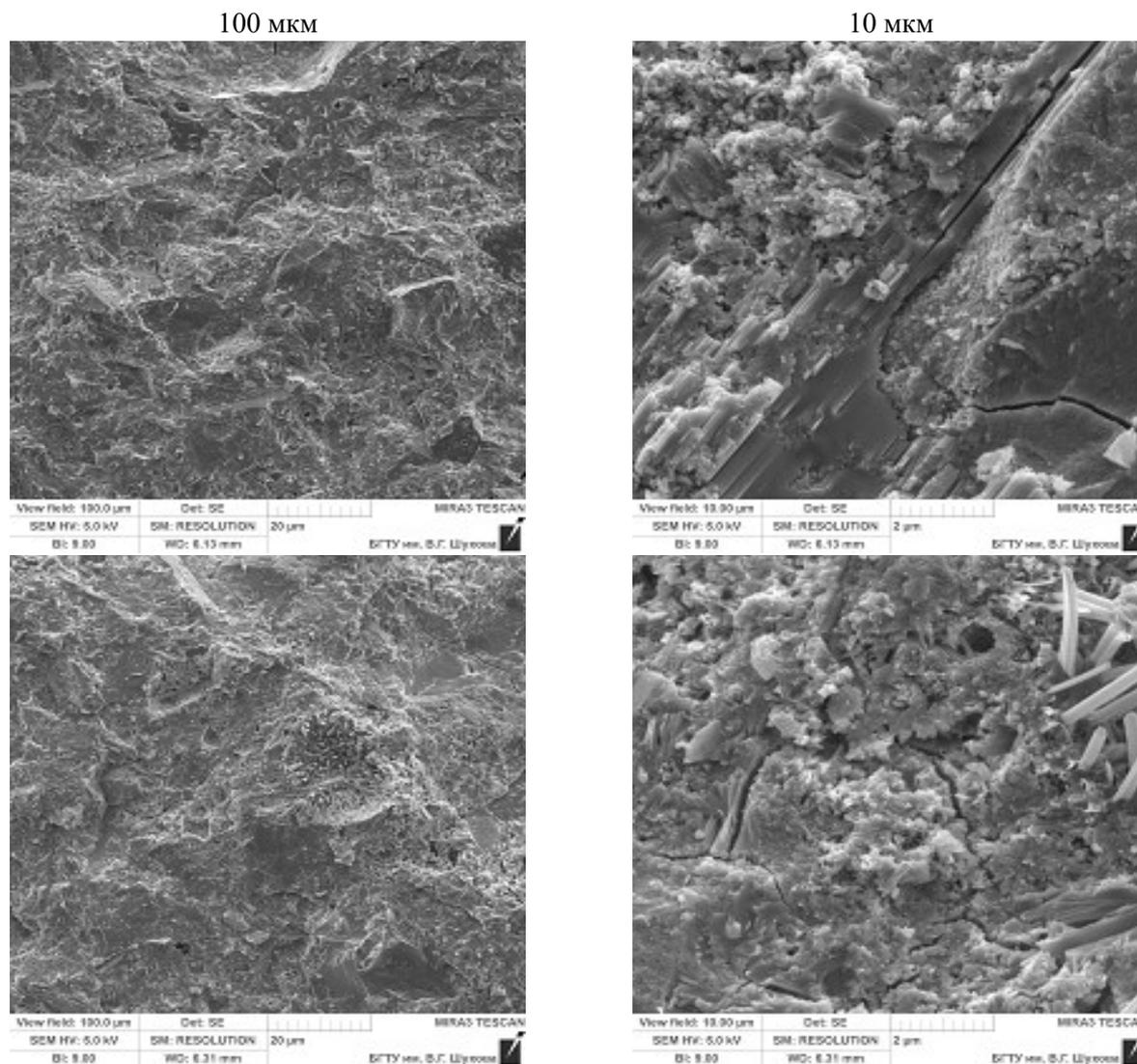


Рис. 9. Микроструктура образцов вяжущей композиции № 6:

цемент /отходы боя керамического кирпича =90/20% при 20 минутах активации в вибрационной мельнице

При твердении цементных вяжущих композиций, приготовленных с использованием различного количества минеральных отходов - боя керамического кирпича, имеют место основные процессы, присущие классической гидратации обычного портландцемента, а также особенности, обусловленные формированием высокоосновных гидратных новообразований и интенсивным протеканием ионообменных процессов с участием минеральной добавки.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках финансируемого РФФИ научно-исследовательского проекта № 22-19-20115 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им.В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Joseph S., Bishnoi S., Van Balen K., Cizer Ö. Modeling the effect of fineness and filler in early-age hydration of tricalcium silicate // Journal of the

American Ceramic Society. 2017. Т. 100. № 3. С. 1178–1194.

2. Wang X.-Y., Luan Y. Modeling of Hydration, Strength Development, and Optimum Combinations of Cement-Slag-Limestone Ternary Concrete // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. Т. 12. № 2. 12.

3. Ley-Hernandez A.M., Lapeyre J., Cook R., Kumar A., Feys D. Elucidating the Effect of Water-To-Cement Ratio on the Hydration Mechanisms of Cement // ACS Omega. 2018. Т. 3. № 5. P. 5092–5105.

4. Biernacki J.J., Bullard J.W., Sant G., Brown K., Glasser F., Jones S., Ley T., Livingston R., Nicoleau L., Olek J., Sanchez F., Shahsavari R., Stutzman P.E., Sobolev K., Prater T. Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities // Journal of the American Ceramic Society. 2017. Т. 100. № 7. С. 2746–2773.

5. Dove P.M., Han N., De Yoreo J.J. Mechanisms of classical crystal growth theory explain

quartz and silicate dissolution behavior // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2005. Т. 102. № 25. С. 15357–15362.

6. Рунова Р.Ф., Носовский Ю.Л. Применение минеральных вяжущих в сухих строительных смесях // Цемент и его применение. 2000. №6. С. 16–21.

7. Халиуллин, М.И. Гайфуллин А.Р. Водостойкие бесклинкерные композиционные гипсовые вяжущие с добавками промышленных отходов // Вестник ТГАСУ. 2017. № 6. С. 127–133.

8. Рахимов Р.З., Халиуллин А.Р., Гайфуллин А.Р. Композиционные гипсовые вяжущие с использованием в составе комплексной добавки керамзитовой пыли и доменных шаков // Сухие строительные смеси. 2014. № 1. С. 19–22.

9. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Мельников А.В. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных микронаполнителей // СтройПРОФИ. 2012. № 3. С. 24–27.

10. Хозин В.Г., Хохлаков О.В., Битцер А.В., Урханова Л.А. Эффективность применения золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС в составе цементов низкой водопотребности // Строительные материалы. 2011. № 7. С. 76–78.

11. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of C-S-H and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques // Hydration kinetics and rheological behavior // Construction and Building Materials. 2018. Т. 184. С. 304–310.

12. Matalkah F., Soroushian P. Carbon dioxide integration into alkali aluminosilicate cement particles for achievement Composites Part B: Engineering. 2018. Т. 151. С. 127–138.

13. Barbosa W., Ramalho R.D., Portella K.F. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: of improved properties // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 196. Pp. 1478–1485.

14. Yang J.-M., Shi C.-J., Chang Y., Yang N. Hydration and hardening characteristics of magnesium potassium phosphate cement paste containing composite retarders // JianzhuCailiaoXuebao / Journal of Building Materials. 2013. Т. 16. № 1. С. 43–49.

15. Zhu Q.-H., Zhang L.-Z., Min X.-M., Yu Y.-X., Zhao X.-F., Li J.-H. Comb-typed polycarboxylate superplasticizer equipped with hyperbranched polyamide teeth // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. № 553. С. 272–277.

16. Сумской Д.А. Теплоизоляционный раствор на основе композиционного вяжущего // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. №2. С. 283–289.

17. Демьянова В.С., Калашников В.И., Борисов А.А. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах // Жилищное строительство. 1999. № 1. С. 17–18.

18. Терликовский Е.В., Третник В.Ю. Использование механической активации для модифицирования неорганических материалов // Тезисы докладов V Всесоюзного семинара 8–10 сентября 1987 г. Таллин. 1987. С. 27–28.

19. Комохов П.Г., Шангина Н.Н. Модифицированный цементный бетон его структура и свойства // Цемент и его применение. 2002. №1. С. 43–46.

20. Студопедия. Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.ru/1_103168_vibratsionnie-melnitsi-.html

Информация об авторах

Махортов Денис Сергеевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: denis-mahortov1995@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: saad.shadeed.ss71@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 16.05.2022 г.

© Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Аль Мамури Саад Кхалил Шадид., 2022

Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.Kh., *Sumskoy D.A., Al Mamouri Saad Khalil Shadeed
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
 *E-mail: pr9nik2011@yandex.ru

OBTAINING BINDER COMPOSITIONS OF OPTIMAL COMPOSITIONS BASED ON PORTLAND CEMENT AND CERAMIC BRICK WASTE

Abstract. *When developing composite binders of a certain functional purpose, it is necessary to rationally select raw materials, taking into account their chemical, mineral and granulometric composition. The use of mechanical activation with the choice of the most suitable grinding unit affects the creation of binder compositions, the functional additives used have a significant impact on the properties of composite binders.*

The article presents the results of obtaining binder compositions of optimal composition based on Portland cement and broken ceramic bricks. Experimental studies of the granulometric composition have been carried out, the results of tests of binder compositions of the compositions: cement – broken ceramic bricks prepared in a mill are given. Compositions of binder compositions with a wide range of use of ceramic cullet waste – brick production waste have been developed and installed.

Using the method of electron microscopy, the features of the microstructure of chips of cement stones synthesized on the basis of Portland cement and various content of mineral filler – ceramic brick slaughter waste, mechanically activated in a vibration mill, were studied. It is noted that the open pores of cement stone chips, synthesized binders, are densely overgrown with various neoplasms of various sizes.

It has been established that the microstructure of hydrated binder compositions is marked by a dense structure due to the use of powdered brick cullet, which compact the structure of the composite, and it is also noted that grains of calcium hydrosilicates grow on the mineral particles of the filler, compacting the overall structure of the composite.

Keywords: *binder composition, ceramic brick waste, Portland cement, mineral filler.*

REFERENCES

1. Joseph S., Bishnoi S., Van Balen K., Cizer Ö. Modeling the effect of fineness and filler in early-age hydration of tricalcium silicate. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100. No. 3. Pp. 1178–1194.
2. Wang X.-Y., Luan Y. Modeling of Hydration, Strength Development, and Optimum Combinations of Cement-Slag-Limestone Ternary Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. No. 2. 12.
3. Ley-Hernandez A.M., Lapeyre J., Cook R., Kumar A., Feys D. Elucidating the Effect of Water-To-Cement Ratio on the Hydration Mechanisms of Cement. *ACS Omega*. 2018. Vol. 3. No. 5. Pp. 5092–5105.
4. Biernacki J.J., Bullard J.W., Sant G., Brown K., Glasser F., Jones S., Ley T., Livingston R., Nicoleau L., Olek J., Sanchez F., Shahsavari R., Stutzman P.E., Sobolev K., Prater T. Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100. No. 7. Pp. 2746–2773.
5. Dove P.M., Han N., De Yoreo J.J. Mechanisms of classical crystal growth theory explain quartz and silicate dissolution behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2005. Vol. 102. No. 25. Pp. 15357–15362.
6. Runova R.F., Nosovsky Yu.L. The use of mineral binders in prison building mixtures [Primenenie mineralnykh vyazhushhih v suhikh stroitelnykh smesyah]. *Cement and Application*. 2000. No. 6. Pp. 16–21. (rus)
7. Khaliullin M.I., Gaifullin A.R. Waterproof clinker-free composite gypsum binders with additives of industrial waste [Vodostojkie besklinkernye kompozitsionnye gipsovye vyazhushhie s dobavkami promyshlennykh othodov]. *Bulletin of TGASU*. 2017. No. 6. Pp. 127–133. (rus)
8. Rakhimov R.Z., Khaliullin A.R., Gaifullin A.R. Composite gypsum binders with the use of expanded clay dust and blast-furnace shacks as part of a complex additive [Kompozitsionnye gipsovye vyazhushhie s ispolzovaniem v sostave kompleksnoj dobavki keramzitovoj pyli i domennykh shakov]. *Dry construction mixtures*. 2014. No. 1. Pp. 19–22. (rus)
9. Berdov G.I., Ilyina L.V., Zyryanova V.N., Nikonenko N.I., Melnikov A.V. Improving the properties of composite building materials by introducing mineral microfillers [Povyshenie svojstv kompozitsionnykh stroitelnykh materialov vvedeniem mineralnykh mikronapolnitelej]. *StroyPROFI*. 2012. No. 3. Pp. 24–27. (rus)
10. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Bitzer A.V., Urkhanova L.A. Efficiency of using fly ash from the Gusinozersk State District Power Plant as part of cements with low water demand [Effektivnost primeneniya zoly-unosa Gusinozerskoj GRES v sostave tsementov nizkoj vodopotrebnosti]. *Stroitel'nye materialy*. 2011. No. 7. Pp. 76–78. (rus)
11. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of

CSH and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques. Hydration kinetics and rheological behavior. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 184. Pp. 304–310.

12. Matakah F., Soroushian P. Carbon dioxide integration into alkali aluminosilicate cement particles for achievement Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 151. Pp. 127–138.

13. Barbosa W., Ramalho R.D., Portella K.F. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: of improved properties. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 196. Pp. 1478–1485.

14. Yang J.-M., Shi C.-J., Chang Y., Yang N. Hydration and hardening characteristics of magnesium potassium phosphate cement paste containing composite retarders. Jianzhu Cailiao Xuebao. Journal of Building Materials. 2013. Vol. 16. No. 1. Pp. 43–49.

15. Zhu Q.-H., Zhang L.-Z., Min X.-M., Yu Y.-X., Zhao X.-F., Li J.-H. Comb-typed polycarboxylate superplasticizer equipped with hyperbranched polyamide teeth. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. No. 553. Pp. 272–277.

Information about the authors

Makhortov, Denis S. Postgraduate student. E-mail: denis-mahortov1995@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

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

Al Mamouri Saad Khalil Shadeed. Postgraduate student. E-mail: saad.shadeed.ss71@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 16.05.2022

Для цитирования:

Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Аль Мамури Саад Кхалил Шаид. Получение вяжущих композиций оптимальных составов на основе портландцемента и отходов боя керамического кирпича // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 19–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-19-30

For citation:

Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.Kh., Sumskoy D.A., Al Mamouri Saad Khalil Shadeed. Obtaining binder compositions of optimal compositions based on portland cement and ceramic brick waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 19–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-19-30

16. Sumskoy D.A. Thermal insulation solution based on a composite binder [Теплоизоляционный раствор на основе композиционного вяжущего]. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. Vol. 80. No. 2. Pp. 283–289. (rus)

17. Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Borisov A.A. On the use of dispersed fillers in cement systems [Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 1999. No. 1. Pp. 17–18. (rus)

18. Terlikovsky E.V., Tretnik V.Yu. The use of mechanical activation for the modification of inorganic materials [Использование механической активации для модифицирования неорганических материалов]. Abstracts of the V All-Union Seminar 8–10 September 1987 Tallinn. 1987. Pp. 27–28. (rus)

19. Komokhov P.G., Shangina N.N. Modified cement concrete, its structure and properties [Модифицированный цементный бетон его структура и свойства]. Cement and its application. 2002. No. 1. Pp. 43–46. (rus)

20. Studiopedia. Official site. URL: https://studiopedia.ru/1_103168_vibratsionnie-melnitsi-.html.

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-31-43

1.**Радайкин О.В.*, ^{1,2}*Сабитов Л.С.*, ³*Клюев С.В.*, ⁴*Хассун М.С.*, ⁵*Аракчеев Т.П.*, ¹*Дарвиш А.*¹Казанский государственный энергетический университет²Казанский (Приволжский) федеральный университет³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова⁴Казанский государственный архитектурно-строительный университет⁵ООО «ГК «ЭПЦ-Гарант», Республика Татарстан

*E-mail: olegxxii@mail.ru

СХОДИМОСТЬ ЧИСЛЕННОГО ДИАГРАММНОГО МЕТОДА НЕЛИНЕЙНОГО РАСЧЁТА СТЕРЖНЕВЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Ранее мы достаточно подробно рассмотрели малоизученный в теории диаграммного метода расчёта железобетонных стержневых элементов вопрос о точности (погрешности). Тесно с ним связано понятие сходимости численной реализации рассматриваемого метода, которое до сих пор оставалось нераскрытым. В статье представлено теоретическое обоснование критерия сходимости численного диаграммного метода расчёта прочности железобетонных изгибаемых элементов. Полученный критерий по форме совпадает с Чебышевой нормой. Из него вытекают критерий останова итерационного процесса вычислений и оценка погрешности численного диаграммного метода. На примере железобетонного элемента с прямоугольным сечением и двойным армированием исследован вопрос сходимости итерационного расчёта прочности при варьировании класса бетона и процента армирования. Установлено, что для всех рассмотренных вариантов конструирования итерационный процесс вычислений сходится после 6-й итерации при начальном приближении кривизны $\chi_0 = 0$ и после 4-й итерации – при $\chi_0 = 10^{-5}$, при этом относительная погрешность расчёта составляет $\delta < 1$ %. Установлено также, что с увеличением процента армирования сходимость расчёта улучшается: при количестве итераций равном 4 погрешность при варианте конструирования В60, $\mu = 0,5$ % составляет 10,3 %, а при В35, $\mu = 3,0$ % – 0,98 %.

Ключевые слова: армированный бетон, нелинейная деформационная модель, диаграммный метод, численный метод, сходимость.

Введение. Ранее мы достаточно подробно рассмотрели малоизученный в численной реализации диаграммного метода расчёта железобетонных стержневых элементов вопрос о его точности (погрешности) [1]. Тесно с этим вопросом связано такое понятие, как сходимость. К сожалению, не нашлось ни одной работы как в отечественной литературе, так и зарубежной, посвящённой теории сходимости рассматриваемого метода. Цель данной публикации – в определённой мере восполнить этот пробел.

Сходимость определяют как приближение (стремление) результата численного метода к истинному (аналитическому) решению задачи. Процесс последовательных приближений считается законченным, если его результаты соответствуют некоторому критерию сходимости.

В статье [2] отмечается, что установить сходимость и оценить быстроту сходимости итерационного процесса не представляется возможным из-за немонотонности итерационного расчёта диаграммным методом. Скорость сходимости итераций зависит от уровня нагружения. На начальных этапах итерационный процесс в пределах шага нагружения сходится в среднем за 10-

15 итераций, по мере приближения к предельному состоянию скорость сходимости замедляется. На точность результата большое влияние оказывает формулировка условия прекращения итерационного процесса указанием величины минимального изменения итерационно уточняемых переменных и предельного числа итераций.

В монографии [3] расчёт статически неопределимых железобетонных конструкций с учётом физической нелинейности предложено вести методом последовательного уточнения жесткостей. Отмечается, что начальное приближение решения не влияет на сходимость итерационного метода, поэтому для формулирования критерия сходимости рекуррентная зависимость для нахождения искомого параметра (усилия в сечении стержня с учётом перераспределения) принята в виде простейшей цепной дроби вида

$$a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \dots}}$$

Согласно теореме А.Я. Хинчина

для сходимости цепной дроби необходимо и достаточно, чтобы ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ был расходящимся.

Сформулировать условие сходимости процесса

последовательного уточнения жесткостей удаётся лишь при рассмотрении простейших систем. Попытки сформулировать это условие для более сложных систем привели к усложнению и критериев сходимости, и аппарата, необходимого для их анализа [4].

В МКЭ, например, в [5] для итерационного уточнения на каждом шаге нагружения напряжениями используется метод переменных параметров упругости (модифицированный алгоритм Ньютона-Рафсона, в котором касательные мо-

дули заменяются на секущие). В качестве критерия сходимости применяется евклидова норма вектора деформаций.

В Методическом пособии [6] нелинейные задачи железобетона решаются в самом общем виде в объёмной постановке методами упругих решений, переменных параметров, начальных напряжений и др. Интерес касемо темы статьи представляет небольшой параграф этого пособия 11.7, в котором приведены общие соображения о критерии сходимости метода упругих решений. Критерий записывается через перемещения в трёх возможных вариантах:

$$\begin{aligned} \|x\|_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta r_i}{r_{\text{эт}}} \right| \leq \varepsilon - \text{октаэдрическая норма,} \\ \|x\|_2 &= \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta r_i}{r_{\text{эт}}} \right)^2 \right]} \leq \varepsilon - \text{Евклидова норма,} \\ \|x\|_3 &= \max \left| \frac{\Delta r_i}{r_{\text{эт}}} \right| \leq \varepsilon - \text{Чебышева норма,} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\|x\|_{1,2,3}$ – норма невязки; ε – константа ($10^{-2} \leq \varepsilon \leq 10^{-6}$); $1 \leq i \leq N$ – номер компоненты решения; Δr_i – разность компонент вычисления перемещений между текущей и предыдущей итерациями;

$r_{\text{эт}} = \begin{cases} \max |r_i| \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_i| \end{cases}$ – эталонная величина перемещений.

Если процесс сходится по одной норме, то он сходится и по любой другой норме. Выбор нормы определяет скорость сходимости. При прочих равных условиях наибольшую скорость сходимости дает Евклидова норма, наименьшую – Чебышева норма.

Использовать вышеприведённые критерии для численного диаграммного метода также возможно, если вместо перемещений r_i использовать напряжения σ_i , деформации ε_i , предельный момент M_{ult} , момент трещинообразования M_{cr} , жёсткость D и др. Но более удобно, на наш взгляд, для железобетонных элементов, испытывающих изгиб (продольный либо поперечный), критерий сходимости строить через кривизну χ . Поскольку кривизна – это интегральный параметр, описывающий деформированное состояние сечения в целом, то на её основе может быть получен критерий сходимости по Чебышеву:

$$\|x\|_3 = \left| \frac{\Delta \chi}{\chi} \right| = \left| \frac{\chi_k - \chi_{k-1}}{\chi_k} \right| \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где χ_k, χ_{k-1} – кривизна оси стержня в расчётном сечении соответственно на текущей и предшествующей итерациях расчёта.

Ниже будет приведён строгий математический вывод этой формулы.

Из своего опыта построения алгоритмов расчёта НДС всевозможных железобетонных элементов численным диаграммным методом [7] сходимость для него может быть рассмотрена в двух формах:

– как сходимость итерационного процесса вычислений (внешний цикл алгоритма), когда для получения результата выполняют последовательные итерации, получая последовательность значений некоего управляющего параметра (обычно кривизны продольной оси железобетонного стержня, реже – относительных продольных деформаций в характерной точке сечения): говорят, что эта последовательность сходится к точному (аналитическому) решению, если при неограниченном возрастании числа итераций решение стремится к действительному и в пределе (при устремлении числа итераций к бесконечности) равно ему;

– как сходимость дискретизации нелинейной деформационной модели нормального сечения при выполнении процедуры численного интегрирования (внутренний цикл алгоритма) нормальных напряжений, σ , секущих модулей, E^{sec} , жесткости по всем компонентам расчётного сечения: под сходимостью в таком случае следует подразумевать стремление значений решения дискретной модели к соответствующим значениям решения исходной задачи при стремлении

к нулю параметра дискретизации (размера малых областей, $\Delta h \times \Delta b$, на которые разбивается сечение).

В статье [8] сходимость численного интегрирования методом Рунге-Кутты определяется условием $|R(\Delta h, \lambda)| < 1$, где R – функция линейной устойчивости (например, полином 4-го порядка), Δh – шаг разбивки, λ – параметр, определяющий связь между функцией и её производной. В монографии [9] рекомендуется для увеличения скорости сходимости использовать формулу Симпсона (правило одной трети). Вопросам сходимости численных методов посвящены также и другие актуальные зарубежные работы [10–15].

Методика. Исследуем последовательно вначале сходимость итерационного процесса вычислений внешнего цикла алгоритма численного диаграммного метода, а затем перейдём ко внутреннему циклу и вопросу дискретизации расчётной модели.

В работе [7] для стержневых элементов, в которых помимо прочих деформаций возникает изгиб, в самом общем виде постановка задачи для решения её численным диаграммным методом состоит в том, чтобы решить уравнение вида:

$$\chi = g(\chi), \quad (3)$$

с корнем t в интервале $[a; b]$. Здесь χ – кривизна оси стержня. При этом в качестве границ интервала, как показывает опыт расчётов, можно принять значения $a = -0,1$, $b = 0,1$ практически для любых железобетонных элементов. Функция g предполагается непрерывной на этом интервале.

Отметим, что при центральном растяжении либо сжатии $\chi = 0$. В таком случае в качестве управляющего параметра итерационного алгоритма можно принять осевую жёсткость сечения $D_{11} = v_b E_b A_b + v_s E_s A_s$.

Вообще говоря, при решении задач, связанных с изгибом железобетонных элементов, в качестве управляющего параметра итерационного алгоритма численного диаграммного метода, вместо кривизны χ , могут быть использованы и другие, связанные с ней параметры: предельный момент – M_{ult} (либо момент трещинообразования – M_{crc}), относительные деформации в характерных точках сечения – $\varepsilon_{bt}|_{y=0}$, $\varepsilon_s|_{y=a}$, $\varepsilon_b|_{y=y_0}$, $\varepsilon'_s|_{y=h-a}$, $\varepsilon_b|_{y=h}$, изгибная жёсткость сечения D_{33} , координата нейтральной линии y_0 и др. При этом, как показали собственные результаты расчётов, закономерности по сходимости алгоритма (приближения управляющего параметра к точному (аналитическому) своему значению) будут качественно идентичными. Причём

$$\|x\|_3 = \left| \frac{\Delta \chi}{\chi} \right| = \left| \frac{\Delta M_{ult}}{M_{ult}} \right| = \left| \frac{\Delta y_0}{y_0} \right| = \dots \text{ и т.д.}$$

Результаты. Решим уравнение (3) численным методом простой итерации. Так, если известен какой-либо член последовательности χ_k , например, $\chi_0 \in [a; b]$, то χ_{k+1} можно взять $g(\chi_k)$. Здесь $k=0, 1, 2, \dots, m$ – соответственно номер текущей итерации и общее количество итераций. Тогда рекуррентная формула метода имеет вид:

$$\chi_{k+1} = g(\chi_k). \quad (4)$$

Если существует конечный предел $\lim_{k \rightarrow \infty} \chi_k = z$ и функция g непрерывна в точке z , переходом к пределу в равенстве (4) получим $z = g(z)$, то есть число z является корнем уравнения (1). Если $z \in [a; b]$, то в силу единственности корня на отрезке $[a; b]$ z совпадает с t .

Вычисления по формуле (4) проиллюстрированы на рис. 1.

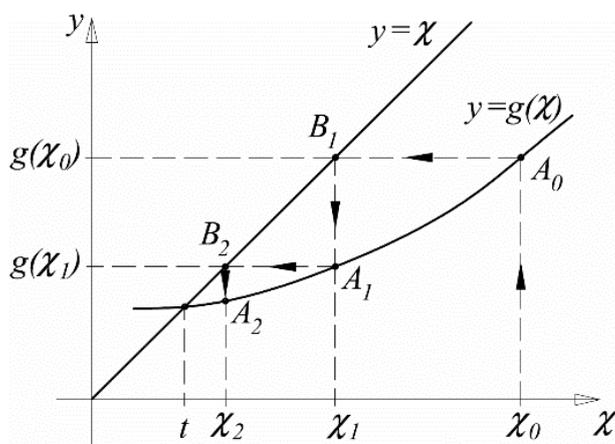


Рис. 1. К численному методу простой итерации для отыскания кривизны

Построим графики функций из левой и правой частей уравнения (3), то есть линии $y = \chi$ и

$y = g(\chi)$. Они должны пересекаться в точке с абсциссой t . Взяв некоторое число χ_0 , вычислим

$g(\chi_0)$ и получим на кривой $y=g(\chi)$ точку A_0 . Линия проекции этой точки на ось Oy пересечёт прямую $y=\chi$ в точке B_1 . Проекция B_1 на ось Ox даёт χ_1 . Из равенства треугольников $\Delta OB_1\chi_1$ и $\Delta OB_1g(\chi_0)$ геометрически $\chi_1=g(\chi_0)$. Проекция χ_1 на кривую $y=g(\chi)$ даёт точку A_1 . Линия проекции этой точки на ось Oy пересечёт прямую $y=\chi$ в точке B_2 . Проекция B_2 на ось Ox даёт χ_2 . Из равенства треугольников $\Delta OB_2\chi_2$ и $\Delta OB_2g(\chi_1)$ геометрически $\chi_2=g(\chi_1)$. Через какое-то количество итераций m величина $\chi_i = \chi_m$ настолько близко подойдёт к t , что её можно буде

считать ответом. Это количество шагов будет определять точность приближения $\Delta_2 > 0$ [1].

Далее запишем условия сходимости итерационного процесса решения. Пусть корень t уравнения (3) отделён на отрезке $[a;b]$ длины h . Если на отрезке $[c;d] = [a-h;b+h]$ функция g дифференцируема и найдётся число $0 < q < 1$ такое что

$$|g'(\chi)| \leq q, \tag{5}$$

при всех $\chi \in [c;d]$, то итерационная последовательность, предложенная формулой (4), сходится к корню t при любом выборе начального приближения $\chi_0 \in [a;b]$ (рис. 2).

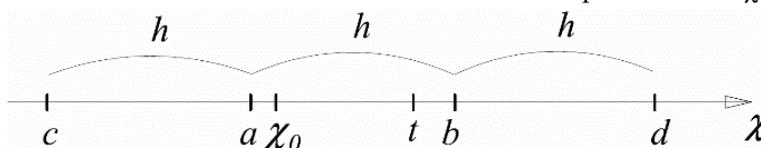


Рис. 2. К вопросу сходимости решения

Геометрически условие (5) означает, что угол наклона касательной к кривой g в любой точке из интервала $[c;d]$ должен быть меньше 45° ($tg45^\circ=1$), то есть меньше угла наклона прямой $y=\chi$ (а он равен ровно 45°). В этом случае линии $y=\chi$ и $y=g(\chi)$ будут иметь пересечение в искомой точке с абсциссой t .

При этом при всех $k=1,2,\dots,m$ числа $\chi_k \in [c;d]$ и верно неравенство (в теории численных методов оно принимается на основе доказательства соответствующей теоремы):

$$|t - \chi_k| \leq q^k h. \tag{6}$$

Это неравенство играет две полезных для нас роли. Во-первых, из него видно, что чем меньше число q , тем быстрее сходится последовательность приближений. Во-вторых, оно является основой для оценки погрешности итерационного метода, о чём чуть ниже.

Если известно, что значения $g(\chi)$ находятся в интервале $[a;b]$, то выполнение условия (5) достаточно потребовать лишь на $[a;b]$, тогда необходимость отрезка $[c;d]$ отпадает.

Запишем ещё одно утверждение: если на отрезке $[a;b]$ длины h функция g дифференцируема и

$$|g'(\chi)| \geq 1 \text{ при всех } \chi \in [a;b], \tag{7}$$

то определяемая формулой (4) итерационная последовательность не сходится к корню $t \in [a;b]$ ни при каком $\chi_0 \neq t$ из этого отрезка.

Геометрически условие (7) означает, что если угол наклона касательной к кривой g в каждой точке из интервала $[a;b]$ получается больше 45° , то есть больше угла наклона прямой $y=\chi$ (а он равен ровно 45°), то тогда линии $y=\chi$ и

$y=g(\chi)$ не будут иметь пересечения в рассматриваемом интервале.

Как уже было сказано выше, оценить погрешность итерационного метода можно из неравенства (6), согласно которому справедлива также следующая формула:

$$|t - \chi_k| \leq \frac{q}{1-q} |\chi_k - \chi_{k-1}|. \tag{8}$$

Обозначим $f(\chi) = \chi - g(\chi)$. Функция $f(\chi)$ дифференцируема, причём

$$|f'(\chi)| = |1 - g'(\chi)| \geq 1 - |g'(\chi)| \geq 1 - q \tag{9}$$

на $[c;d]$. Учитывая определение функции f и то, что $f(t) = 0$, имеем

$$|\chi_{k+1} - \chi_k| = |g(\chi_k) - \chi_k| = |-f(\chi_k)| = |f(t) - f(\chi_k)|$$

. Применив сначала теорему Лагранжа с некоторым числом d_n между t и χ_i , а затем неравенство (1), получим:

$$|\chi_{k+1} - \chi_k| = |f'(d_n)| |t - \chi_k| \geq (1 - q) |t - \chi_k|. \tag{10}$$

Модуль разности $|\chi_{k+1} - \chi_k|$ можно оценить и сверху. Поскольку $\chi_{k+1} - \chi_k = g(\chi_k) - g(\chi_{k-1})$, на основе теоремы Лагранжа с числом p_n между χ_k, χ_{k-1} и неравенства (10), получим

$$|\chi_{k+1} - \chi_k| = |g'(p_n)| |\chi_k - \chi_{k-1}| \leq q |\chi_k - \chi_{k-1}| \tag{11}$$

Чтобы получить требуемую оценку (8), надо выделить $|t - \chi_k|$ из неравенства (10) и учесть (11).

Таким образом, если задана точность приближённого корня $\Delta > 0$, то итерационный

процесс необходимо закончить при выполнении условия

$$\Delta = \frac{q}{1-q} |\chi_k - \chi_{k-1}| \leq [\Delta] \quad (12)$$

и взять $t \approx \chi_k$.

Условие (12) и есть оценка погрешности численного метода простой итерации.

Число $0 < q < 1$ может быть принято произвольно, удобно взять $q=0,5$, тогда из (12) следует

$$\Delta = |\chi_k - \chi_{k-1}| \leq [\Delta]. \quad (13)$$

Мы получили строгое математическое обоснование для оценки точности (погрешности) численного диаграммного метода в случае изгиба или внецентренного сжатия. В относительных величинах условие (13) запишется:

$$\delta = \left| \frac{\chi_k - \chi_{k-1}}{\chi_k} \right| \cdot 100\% \leq [\delta]. \quad (14)$$

При этом по смыслу это и есть критерий сходимости по Чебышеву – см. формулу (2).

Рассмотрим теперь кратко сходимость дискретизации нелинейной деформационной модели нормального сечения при выполнении процедуры численного интегрирования (внутренний цикл алгоритма) изгибной

$$D'_{bx} = \Delta_h b \sum_{i=0}^{n-1} E_{b,i}^{sec} (y_0 - y_i)^2 \text{ – левые прямоугольники, степень полинома } m_p=0;$$

$$D'_{bx} = \Delta_h b \sum_{i=1}^n E_{b,i}^{sec} (y_0 - y_i)^2 \text{ – правые прямоугольники, } m_p=0;$$

$$D'_{bx} = \Delta_h b \sum_{i=0}^{n-1} E_{b,i+\frac{1}{2}}^{sec} \left(y_0 - y_{i+\frac{1}{2}} \right)^2 \text{ – средние прямоугольники, } m_p=1;$$

$$D'_{bx} = \frac{\Delta_h}{2} b \sum_{i=0}^{n-1} \left[E_{b,i}^{sec} (y_0 - y_i)^2 + E_{b,i+1}^{sec} (y_0 - y_{i+1})^2 \right] \text{ – трапеции, } m_p=1;$$

$$D'_{bx} = \frac{\Delta_h}{6} b \sum_{i=0}^{n-1} \left[E_{b,i}^{sec} (y_0 - y_i)^2 + 4 + E_{b,i+\frac{1}{2}}^{sec} \left(y_0 - y_{i+\frac{1}{2}} \right)^2 + E_{b,i+1}^{sec} (y_0 - y_{i+1})^2 \right] \text{ – формула}$$

Симпсона, $m_p=3$.

В СП 63.13330 применяется формула правых либо левых прямоугольников (не уточняется), как наиболее простая.

Получить аналитически критерий сходимости можно на основе остаточного члена той или иной квадратурной формулы (15) в виде

$$E(D_{bx}) = \frac{D_{bx}(y) - D'_{bx}(y)}{D_{bx}(y)} \leq [\delta_{21}], \quad (16)$$

где $[\delta_{21}] = 1...3\%$ заданная предельная погрешность [1].

Изменяя шаг дискретизации Δ_h расчётной схемы, можно добиться выполнения условия (16). При этом $E(D_{bx}) \rightarrow 0$, когда $\Delta_h \rightarrow 0$.

жёсткости на примере бетонной части поперечного сечения $D_{bx} = D_{bx}(y)$ (арматура дискретизации согласно численному диаграммному методу не подвергается, поэтому в исследовании сходимости с целью упрощения её жёсткость не учитываем). Для рассматриваемого примера

$$D_{bx}(y) = b \int_0^h E_b (y_0 - y)^2 dy, \quad \text{где}$$

$$E_b = \frac{\partial \sigma_b(\varepsilon_b, y, M, B, A... \alpha_j \dots)}{\partial \varepsilon_b(y, M, B, A... \alpha_j \dots)},$$

$y_0 = y_0(M, B, A... \alpha_j \dots)$ – сложные нелинейные функции многих переменных, получить аналитические формулы, для которых в принципе возможно и они будут довольно громоздкими, но в рамках данных исследований в этом нет необходимости. Тем не менее, функция $D_{bx}(y)$ может быть аппроксимирована полиномом нулевой, первой и четвёртой степени и соответственно для её вычисления используют формулы численного интегрирования прямоугольников (левых, правых и срединных), трапеций и Симпсона:

(15)

Исследуем вопрос сходимости численного диаграммного метода на примере железобетонного изгибаемого элемента прямоугольного профиля, $b \times h = 200 \times 500$ мм, изготовленного из тяжёлого бетона класса по прочности В10-В60 – var. Для бетона используется усовершенствованная криволинейная диаграмма Карпенко Н.И. [2], для арматуры – двухлинейная Прандтля по СП 63.13330. Площадь сечения нижней растянутой арматуры A_s – переменная (var), верхнее армирование – конструктивное (2Ø12 А500С). При этом общий процент армирования сечения $\mu = (A_s + A'_s) / (bh)$ меняется от 0,5 до 3 %. Привязка арматуры к граням бетона: $a_s = a'_s = 30$ мм. Для

удобства анализа решение уравнения (1) представим в виде известной зависимости $\chi_k = \frac{M_{ult,k}}{D_k}$, из неё получим $M_{ult,k} = \chi_k D_k$ – предельный изгибающий момент, который способно воспринять рассматриваемое железобетонное сечение. Для определения $M_{ult,k}$ воспользуемся ранее предложенным алгоритмом [2], но при этом будем вычислять его на каждой

итерации, количество которых примем $m=1...10$ – var. Количество разбиений на элементарные площадки по высоте сечения примем $n=20$ – const. Начальное приближение кривизны и координаты уровня нулевой линии соответственно: $\chi_0 = 0$ либо $\chi_0 = 10^{-5}$, $y_0 = \frac{h}{2} = 0,25$ м. Результаты вычисления $M_{ult,k}$ сведём в таблицы 1 и 2.

Таблица 1

Результаты вычисления $M_{ult,k}$, кН×м при $\chi_0 = 0$

№	Конструирование	Итерации									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	B10, $\mu=0,5\%$	0	80.722	51.095	41.854	40.559	40.594	40.751	40.708	40.753	40.764
2	B35, $\mu=0,5\%$	0	178.785	82.246	54.464	48.753	47.719	47.368	47.369	47.37	47.37
3	B60, $\mu=0,5\%$	0	247.317	98.665	59.417	50.78	49.507	49.399	49.382	49.379	49.379
4	B10, $\mu=1,75\%$	0	96.536	104.782	105.648	106.592	107.136	107.324	107.387	107.408	107.415
5	B35, $\mu=1,75\%$	0	202.189	171.924	164.691	165.212	165.723	165.86	165.894	165.903	165.905
6	B60, $\mu=1,75\%$	0	274.067	203.775	187.29	185.479	184.952	184.962	184.964	184.964	184.964
7	B10, $\mu=3,0\%$	0	105.915	128.031	128.436	128.811	128.885	128.998	129.042	129.059	129.065
8	B35, $\mu=3,0\%$	0	219.958	227.188	224.973	225.769	226.303	226.449	226.488	226.498	226.5
9	B60, $\mu=3,0\%$	0	295.71	272.963	264.561	263.699	263.729	263.739	263.741	263.741	263.741

Таблица 2

Результаты вычисления $M_{ult,k}$, кН×м при $\chi_0 = 10^{-5}$

№	Конструирование	Итерации									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	B10, $\mu=0,5\%$	182.656	43.489	40.874	40.497	40.714	40.789	40.722	40.756	40.765	40.768
2	B35, $\mu=0,5\%$	320.565	66.208	51.036	47.874	47.366	47.369	47.37	47.37	47.37	47.37
3	B60, $\mu=0,5\%$	365.497	83.148	55.728	50.5	49.483	49.395	49.381	49.379	49.379	49.379
4	B10, $\mu=1,75\%$	208.476	107.754	107.529	107.455	107.431	107.423	107.42	107.419	107.419	107.419
5	B35, $\mu=1,75\%$	347.837	165.594	164.813	165.609	165.83	165.887	165.901	165.904	165.905	165.905
6	B60, $\mu=1,75\%$	392.95	192.661	185.765	184.947	184.959	184.963	184.964	184.964	184.964	184.964
7	B10, $\mu=3,0\%$	230.016	134.103	130.423	129.502	129.222	129.125	129.09	129.077	129.072	129.07
8	B35, $\mu=3,0\%$	371.92	225.143	225.856	226.328	226.456	226.49	226.498	226.5	226.501	226.501
9	B60, $\mu=3,0\%$	417.493	266.654	264.253	263.712	263.735	263.74	263.741	263.741	263.741	263.741

Представим численные данные графически в системе координат « $M_{ult,k}/M_{ult,2} - k$ » – для табл. 1, и « $M_{ult,k}/M_{ult,1} - k$ » – для табл. 2, где $M_{ult,k}$, $M_{ult,1}$, $M_{ult,2}$ – предельный момент соответственно на текущей k -й, 1-й и 2-й итерациях.

Для табличных численных данных на 1-й и 10-й (последней) итерациях построим аппроксимирующую функцию двух переменных в виде полинома 2-й степени (двумерную полиномиальную регрессию порядка $n_p=2$): $F(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$, где $x = \mu = (0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 1,75 \ 1,75 \ 1,75 \ 3 \ 3 \ 3)^T$, $y = B = (10 \ 35 \ 60 \ 10 \ 35 \ 60 \ 10 \ 35 \ 60)^T$

, $F(x, y) = M_{ult,k}$ либо $F(x, y) = M_{ult,k}/M_{ult,1}$ ($F(x, y) = M_{ult,k}/M_{ult,2}$). Для полиномиальной поверхности порядка n_p количество точек аппроксимации должно быть больше или равно $n_{ap} = 9 \geq (n_p + 1)(n_p + 2)/2 = 6$ – условие выполняется. Средствами ПК *MathCAD*, применяя встроенную функцию *regress/interp*, построим следующие поверхности 2-го порядка, представленные на рис. 3.

Для дальнейшего изучения сходимости на рассматриваемом примере уравнение (5) запишем так:

$$|M'_{ult}| \leq q, \tag{17}$$

где q , напомним – произвольное число, удовлетворяющее неравенству $0 < q < 1$. Примем $q=0,5$.

В выражении (17) производную слева представим численно через соответствующие приращения функции $M_{ult,k+1} - M_{ult,k}$ и аргумента $k+1-k=1$, тогда:

$$|M_{ult,k+1} - M_{ult,k}| \leq 0,5. \quad (18)$$

Результаты расчёта левой части формулы (16) представим в таблицах ниже.

Таблица 3

Результаты вычисления левой части (16) при $\chi_0 = 0$

№	Конструирование	Итерации									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	B10, $\mu=0,5\%$	-	80,722	29,627	9,241	1,295	0,035	0,157	0,043	0,045	0,011
2	B35, $\mu=0,5\%$	-	178,785	96,539	27,782	5,711	1,034	0,351	0,001	0,001	0
3	B60, $\mu=0,5\%$	-	247,317	148,652	39,248	8,637	1,273	0,108	0,017	0,003	0
4	B10, $\mu=1,75\%$	-	96,536	8,246	0,866	0,944	0,544	0,188	0,063	0,021	0,007
5	B35, $\mu=1,75\%$	-	202,189	30,265	7,233	0,521	0,511	0,137	0,034	0,009	0,002
6	B60, $\mu=1,75\%$	-	274,067	70,292	16,485	1,811	0,527	0,01	0,002	0	0
7	B10, $\mu=3,0\%$	-	105,915	22,116	0,405	0,375	0,074	0,113	0,044	0,017	0,006
8	B35, $\mu=3,0\%$	-	219,958	7,23	2,215	0,796	0,534	0,146	0,039	0,01	0,002
9	B60, $\mu=3,0\%$	-	295,71	22,747	8,402	0,862	0,03	0,01	0,002	0	0

Таблица 4

Результаты вычисления левой части (16) при $\chi_0 = 10^{-5}$

№	Конструирование	Итерации									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	B10, $\mu=0,5\%$	-	139,167	2,615	0,377	0,217	0,075	0,067	0,034	0,009	0,003
2	B35, $\mu=0,5\%$	-	254,357	15,172	3,162	0,508	0,003	0,001	0	0	0
3	B60, $\mu=0,5\%$	-	282,349	27,42	5,228	1,017	0,088	0,014	0,002	0	0
4	B10, $\mu=1,75\%$	-	100,722	0,225	0,074	0,024	0,008	0,003	0,001	0	0
5	B35, $\mu=1,75\%$	-	182,243	0,781	0,796	0,221	0,057	0,014	0,003	0,001	0
6	B60, $\mu=1,75\%$	-	200,289	6,896	0,818	0,012	0,004	0,001	0	0	0
7	B10, $\mu=3,0\%$	-	95,913	3,68	0,921	0,28	0,097	0,035	0,013	0,005	0,002
8	B35, $\mu=3,0\%$	-	146,777	0,713	0,472	0,128	0,034	0,008	0,002	0,001	0
9	B60, $\mu=3,0\%$	-	150,839	2,401	0,541	0,023	0,005	0,001	0	0	0

а)

б)

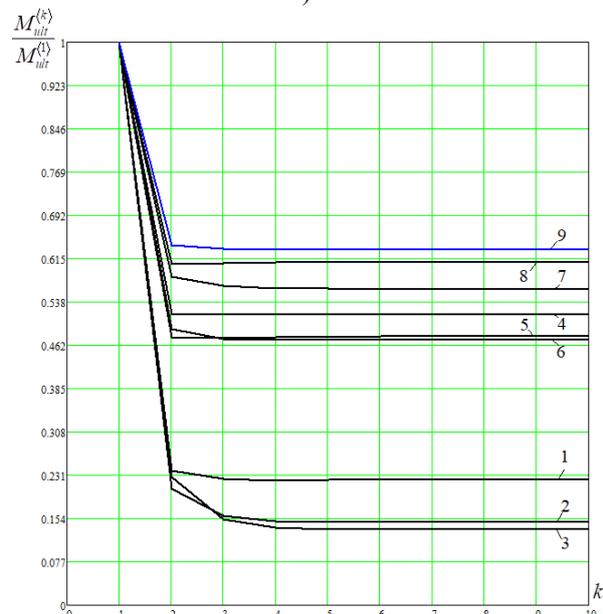
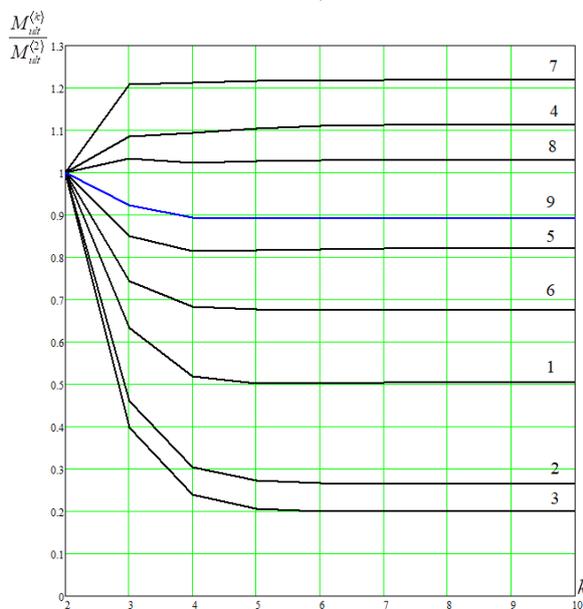


Рис. 2. Графики зависимости « $M_{ult,k} / M_{ult,2} - k$ » при $\chi_0 = 0$ (а) и « $M_{ult,k} / M_{ult,1} - k$ » при $\chi_0 = 10^{-5}$ (б) для различных вариантов конструирования железобетонного сечения 1...9 (см. табл. 1, 2)

а)

б)

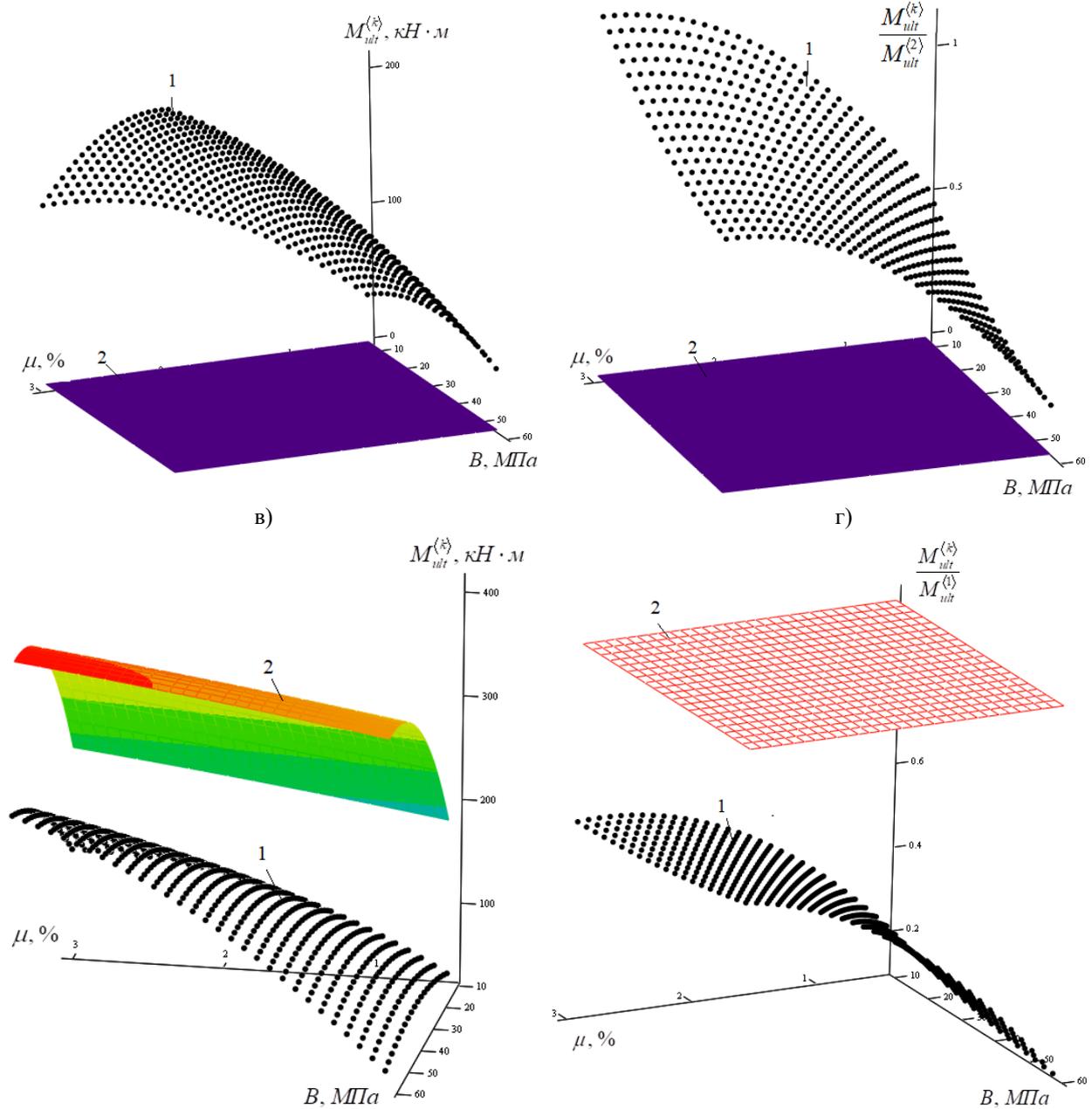


Рис. 2. Графики двумерной полиномиальной регрессии $F(\mu, B)$ для случая $\chi_0 = 0$ (а, б) и $\chi_0 = 10^{-5}$ (в, г):
 1 – на 10-й (последней итерации), 2 – на 1-й итерации (а, б) либо 2-й итерации (в, г)

Таблица 4

Результаты вычисления левой части (16) при $\chi_0 = 10^{-5}$

№	Конструирование	Итерации									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	V10, $\mu=0,5\%$	-	139,167	2,615	0,377	0,217	0,075	0,067	0,034	0,009	0,003
2	V35, $\mu=0,5\%$	-	254,357	15,172	3,162	0,508	0,003	0,001	0	0	0
3	V60, $\mu=0,5\%$	-	282,349	27,42	5,228	1,017	0,088	0,014	0,002	0	0
4	V10, $\mu=1,75\%$	-	100,722	0,225	0,074	0,024	0,008	0,003	0,001	0	0
5	V35, $\mu=1,75\%$	-	182,243	0,781	0,796	0,221	0,057	0,014	0,003	0,001	0
6	V60, $\mu=1,75\%$	-	200,289	6,896	0,818	0,012	0,004	0,001	0	0	0
7	V10, $\mu=3,0\%$	-	95,913	3,68	0,921	0,28	0,097	0,035	0,013	0,005	0,002
8	V35, $\mu=3,0\%$	-	146,777	0,713	0,472	0,128	0,034	0,008	0,002	0,001	0
9	V60, $\mu=3,0\%$	-	150,839	2,401	0,541	0,023	0,005	0,001	0	0	0

В таблицах 3 и 4 цветом выделены значения производной, удовлетворяющие неравенству (16).

Установлены следующие закономерности:

1 – для всех рассмотренных вариантов конструирования итерационный процесс вычислений сходится после 6-й итерации при $\chi_0 = 0$ и после 4-й итерации при $\chi_0 = 10^{-5}$, при этом относительная погрешность расчёта составляет менее $\delta < 1\%$;

2 – с увеличением класса бетона по прочности отношения $M_{ult,k}/M_{ult,1}$ и $M_{ult,k}/M_{ult,2}$ падают, исключение составляют сильно армированные элементы при $\chi_0 = 10^{-5}$, для них $M_{ult,k}/M_{ult,1}$ – растёт; соответственно в первом случае увеличение прочности бетона, а во втором – её уменьшение, приводит к необходимости увеличения числа итераций для обеспечения сходимости с заданной точностью;

3 – с увеличением процента армирования сходимость расчёта улучшается; например, при количестве итераций равном 4, погрешность при варианте конструирования В60, $\mu = 0,5\%$ составляет 10,3%, а при В35, $\mu = 3,0\%$ – 0,98%;

4 – для слабо- и среднеармированных элементов приближение к решению задачи (к корню уравнения $\chi = g(\chi)$) происходит слева, следовательно, тангенс угла карательной здесь

отрицательный, а функция $g(\chi)$ является убывающей, для сильно армированных элементов наоборот: приближение к решению задачи происходит справа, следовательно, тангенс угла карательной здесь положительный, а функция $\chi = g(\chi)$ является возрастающей; и при каких-то комбинациях значений параметров B и μ может быть достигнут минимум функции $g(\chi)$, в этом случае уже на 2-й итерации будет обеспечена нулевая погрешность расчёта;

5 – для улучшения сходимости в инженерных расчётах рекомендовано принимать начальное значение кривизны $\chi_0 = 10^{-5}$, а количество итераций – не менее 6, что обеспечит не превышение относительной погрешности расчёта $\delta < 1\%$.

Теперь перейдём к вопросу о влиянии числа разбиений n расчётного сечения железобетонного элемента на сходимость дискретизации нелинейной деформационной модели. На том же примере, рассмотренном выше, для характерных вариантов конструирования № 3 и 7 вычислим на 10-й итерации значение предельного момента $M_{ult,10}$ при числе разбиений равном $m = 2, 5, 10, 15$ и 20. Полученные результаты сведём в нижеследующие таблицу и график.

Таблица 5

Результаты вычисления $M_{ult,10}$, кН×м в зависимости от числа разбиений сечения n

№	Конструирование	Число разбиений сечения, n				
		2	5	10	15	20
3	В60, $\mu = 0,5\%$	40.863	47.737	49.569	49.451	49.379
7	В10, $\mu = 3,0\%$	122.093	129.101	129.203	129.124	129.065

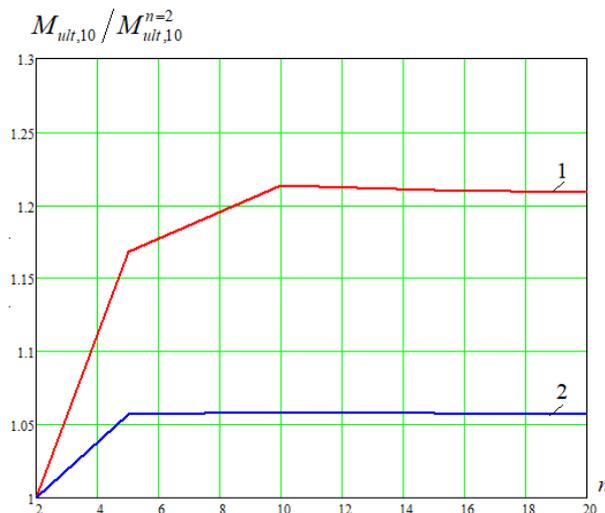


Рис. 3. График зависимости $M_{ult,10}$, кН×м от числа разбиений сечения n :
1 – для варианта конструирования №3, 2 – для варианта №7

Таким образом, сходимость дискретизации расчётной модели зависит от конструирования сечения: итерационные вычисления при высоком проценте армирования и низкой прочности бетона сходятся быстрее, чем при низком проценте армирования и высокой прочности бетона. При этом во всех случаях число разбиений $n \geq 10$ обеспечивает сходимость с приемлемой погрешностью менее 0,1 %.

Выводы.

1. Представлено теоретическое обоснование критерия сходимости численного диаграммного метода расчёта прочности железобетонных стержневых изгибаемых элементов. Полученный критерий подобен Чебышевой норме.

2. На примере элемента с прямоугольным железобетонным сечением и двойным армированием исследован вопрос сходимости итерационного расчёта прочности. Установлено, что для всех рассмотренных вариантов конструирования итерационный процесс вычислений сходится после 6-й итерации при начальном приближении кривизны $\chi_0 = 0$ и после 4-й итерации при $\chi_0 = 10^{-5}$, при этом относительная погрешность расчёта составляет менее $\delta < 1$ %.

3. Для улучшения сходимости в инженерных расчётах рекомендовано принимать начальное значение кривизны $\chi_0 = 10^{-5}$, а количество итераций – не менее 6, что обеспечит не превышение относительной погрешности расчёта $\delta < 1$ %.

4. Сходимость дискретизации расчётной модели зависит от конструирования сечения: итерационные вычисления при высоком проценте армирования и низкой прочности бетона сходятся быстрее, чем при низком проценте армирования и высокой прочности бетона. При этом во всех случаях число разбиений $n \geq 10$ обеспечивает сходимость с приемлемой погрешностью менее 0,1 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радайкин О.В., Сабитов Л.С., Ключев С.В., Ахтямова Л.Ш., Аракчеев Т.П., Дарвиш А. Точность численного диаграммного метода расчёта стержневых железобетонных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 6. С. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-25-34

2. Коваленко Г.В., Меньщикова Н.С. Учет физической нелинейности железобетона при оценке изменения изгибной жесткости конструкций со смешанным армированием // Системы, методы, технологии. 2010. №1. С. 63–67.

3. Дыховичный А.А. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Киев: Будівельник, 1978. 104 с.

4. Сливкер В.И. Расчёт конструкций с нелинейными связями. В сб. «Исследования по теории сооружения». Вып. XVI. М.: Стройиздат, 1968.

5. Клованич С.Ф., Безушко Д.И. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций. Одесса: Издательство ОНМУ, 2009. 89 с.

6. Карпенко Н.И., Травуш В.И., Карпенко С.Н., Корсун В.И., Петров А.Н., Ерышев В.А., Ярин Л.И., Чепизубов И.Г., Моисеенко Г.А., Степанов М.В., Семенова Н.Г. Методическое пособие автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии. М.: ФАУ ФЦС, 2019. 137 с.

7. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчёта: монография. М.: Изд-во АСВ, 2019. 194 с.

8. Boldo S., Faissole F., Chapoutot A. Round-off Error Analysis of Explicit One-Step Numerical Integration Methods // 24th IEEE Symposium on Computer Arithmetic, Jul 2017, London, United Kingdom [Electronic resource]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01581794> (дата обращения 16.02.2022)

9. Hsu T.-R. Applied Engineering Analysis. Wiley & Sons, 2018. 528 p.

10. Nut G., Chiorean I., Blaga P. Convergence and Error of Some Numerical Methods for Solving a Convection-Diffusion Problem. Applied Mathematics. 2013. Vol. 4. No. 5A. Pp. 72-79.

11. Engquist B. Encyclopedia of Applied and Computational Mathematics. Springer, 2015. 312 p.

12. Klivanov M.V., Li J., Zhang W. A globally convergent numerical method for a 3D coefficient inverse problem for a wave-like equation. Mathematics, 2016. 31 p.

13. Amat S., Busquier S. Convergence and numerical analysis of a family of two-step steffensen's methods Computers // Mathematics with Applications. 2005. Vol. 49. No. 1. Pp. 13–22.

14. Chasnov J.R. Numerical Methods. The Hong Kong University of Science and Technology, 2021. 60 p.

15. Turuna D.A., Woldaregay M.M., Duressa G.F. Uniformly Convergent Numerical Method for Singularly Perturbed Convection-Diffusion

Problems. Kyungpook Mathematical Journal. 2020.
No. 60. Pp. 629–645.

Информация об авторах

Радайкин Олег Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечение предприятий, строительства зданий и сооружений. E-mail: olegxxii@mail.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

Сабитов Линар Салихзанович, кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечение предприятий, строительства зданий и сооружений. E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru. Казанский государственный энергетический университет. Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51. Казанский (Приволжский) федеральный университет. Россия, 420111, г. Казань, ул. Кремлёвская улица, д. 18.

Клюев Сергей Васильевич, кандидат технических наук, начальник УНИР. E-mail: Klyuyev@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хассун Мажд Сухайль, аспирант кафедры железобетонные и каменные конструкции. E-mail: king123king278@gmail.com. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420097, г. Казань, ул. Зелёная, 1.

Аракчеев Тимур Павлович, заместитель руководителя. E-mail: epc420107@mail.ru. ООО «ГК «ЭПЦ-Гарант». Россия, 420107, Республика Татарстан, г. Казань, Петербургская ул., д. 55, литера 3 офис 14.

Дарвиш Анас, аспирант кафедры энергообеспечение предприятий, строительства зданий и сооружений. E-mail: olegxxii@mail.ru. ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

Поступила 04.03.2022 г.

© Радайкин О.В., Сабитов Л.С., Клюев С.В., Хассун М.С., Аракчеев Т.П., Дарвиш А., 2022

^{1,*}Radaykin O.V., ^{1,2}Sabitov L.S., ³Klyuev S.V., ⁴Hassoun M.S., ⁵Arakcheev T.P., ¹Darvish A.

¹Kazan State Power Engineering University

²Kazan (Volga Region) Federal University

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

⁴Kazan state University of architecture and construction

⁵LLC «GC «EPC-Garant»

*E-mail: olegxxii@mail.ru

CONVERGENCE OF THE NUMERICAL DIAGRAM METHOD OF NONLINEAR CALCULATION OF CORE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Abstract. Earlier, authors considered the under-examined question of accuracy (error) in the theory of the diagram method for calculating reinforced concrete core elements. The notion of convergence of the numerical implementation of the method under consideration is closely related to it, which has so far remained undisclosed. The article presents a theoretical justification of the convergence criterion of a numerical diagram method for calculating the strength of reinforced concrete bendable elements. The resulting criterion coincides in form with the Chebyshev norm. It implies a criterion for stopping the iterative calculation process and an estimate of the error of the numerical diagram method. Using the example of a reinforced concrete element with a rectangular cross section and double reinforcement, the issue of convergence of iterative strength calculation with varying concrete class and percentage of reinforcement is investigated. It is established that for all the considered design variants, the iterative calculation process converges after the 6th iteration at the initial curvature approximation $\chi_0 = 0$ and after the 4th iteration at $\chi_0 = 10^{-5}$, with a relative calculation error of $\delta < 1\%$. In addition, it is found that with an increase in the percentage of reinforcement, the convergence of the calculation improves: with the number of iterations equal to 4, the error in the design variant B60, $\mu = 0.5\%$ is 10.3%, and with B35, $\mu = 3.0\%$ –0.98%.

Keywords: reinforced concrete, nonlinear deformation model, diagram method, deformation diagrams, numerical method, convergence.

REFERENCES

1. Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuev S.V., Ahtjamova L.Sh., Arakcheev T.P., Darvish A. Accuracy of the numerical diagram method for calculating bar reinforced concrete elements. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 6. Pp. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-25-34
2. Kovalenko G.V., Menshchikova N.S. Taking into account the physical nonlinearity of reinforced concrete when assessing changes in the bending stiffness of structures with mixed reinforcement [Uchet fizicheskoy nelineynosti zhelezobetona pri ocnke izmeneniya izgibnoj zhestkosti konstrukcij so smeshannym armirovaniem]. Systems, methods, technologies. 2010. No. 1. Pp. 63–67. (rus)
3. Dykhovichny A.A. Statically indeterminate reinforced concrete structures [Sticheski neopredelime zhelezobetonnye konstrukcii]. Kiev: Budivelnik. 1978. 104 p. (rus)
4. Slivker V.I. Calculation of constructions with nonlinear connections. Studies on the theory of construction [Raschyot konstrukcij s nelinejnymi svyazyami]. Issue XVI. M.: Stroyizdat. 1968. (rus)
5. Klovanich S.F., Bezushko D.I. Finite element method in nonlinear calculations of spatial reinforced concrete structures [Metod konechnyh elementov v nelinejnyh raschetah prostranstvennyh zhelezobetonnyh konstrukcij]. Odessa: ONMU Publishing House. 2009. 89 p. (rus)
6. Karpenko N.I., Travush V.I., Karpenko S.N., Korsun V.I., Petrov A.N., Yeryshev V.A., Yarin L.I., Chepizubov I.G., Moiseenko G.A., Stepanov M.V., Semenova N.G. Methodical manual automated methods for calculating massive reinforced concrete structures under volumetric stress state [Metodicheskoe posobie avtomatizirovannye metody rascheta massivnyh zhelezobetonnyh konstrukcij pri ob"emnom napryazhennom sostoyanii]. Moscow: FAA FTS, 2019. 137 p. (rus)
7. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. Design of concrete, reinforced concrete, stone and reinforced stone elements and structures with the use of diagram calculation methods: monograph [Proektirovanie betonnyh, zhelezobetonnyh, kamennyh i armokamennyh elementov i konstrukcij s primeneniem diagrammnyh metodov raschyota: monografiya]. Moscow: Publishing House of the ASV, 2019. 194 p. (rus)
8. Boldo S., Faissole F., Chapoutot A. Round-off Error Analysis of Explicit One-Step Numerical Integration Methods // 24th IEEE Symposium on Computer Arithmetic, Jul 2017, London, United Kingdom [Electronic resource]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01581794> date of the application 16.02.2022)
9. Hsu T.-R. Applied Engineering Analysis. Wiley & Sons, 2018. 528 p.
10. Nut G., Chiorean I., Blaga P. Convergence and Error of Some Numerical Methods for Solving a Convection-Diffusion Problem. Applied Mathematics. 2013. Vol. 4. No. 5A. Pp. 72–79.
11. Engquist B. Encyclopedia of Applied and Computational Mathematics. Springer, 2015. 312 p.
12. Klibanov M.V., Li J., Zhang W. A globally convergent numerical method for a 3D coefficient inverse problem for a wave-like equation. Mathematics, 2016. 31 p.
13. Amat S., Busquier S. Convergence and numerical analysis of a family of two-step steffensen's methods Computers // Mathematics with Applications. 2005. Vol. 49. No. 1. Pp. 13–22.
14. Chasnov J.R. Numerical Methods. The Hong Kong University of Science and Technology, 2021. 60 p.
15. Turuna D.A., Woldaregay M.M., Duressa G.F. Uniformly Convergent Numerical Method for Singularly Perturbed Convection-Diffusion Problems. Kyungpook Mathematical Journal. 2020. No. 60. Pp. 629–645.

Information about the authors

Radaykin, Oleg V. PhD, Assistant Professor. E-mail: olegxxii@mail.ru. Kazan State Power Engineering University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51.

Sabitov, Linar S. PhD, Assistant Professor. E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru. Kazan State Power Engineering University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51. Kazan (Volga Region) Federal University. Russia, 420111, Kazan, Kremlevskaya str., 18.

Klyuev, Sergey V. PhD, Head of the UNIR. E-mail: Klyuyev@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Hassoun, Majd S. postgraduate student. E-mail: king123king278@gmail.com. Kazan state University of architecture and construction. Russia, 420097, Kazan, Zelenaja str., 1.

Arakcheev, Timur P. Deputy head. E-mail: epc420107@mail.ru. LLC "GC "EPC-Garant". Russia, 420107, Republic of Tatarstan, Kazan, Peterburgskaya str., 55, litera 3 office 14.

Darvish Anas. Postgraduate student. E-mail: olegxxii@mail.ru. Kazan State Power Engineering University. Russia, 420066, Kazan, Krasnoselskaya str., 51.

Received 04.03.2022

Для цитирования:

Радайкин О.В., Сабитов Л.С., Ключев С.В., Хассун М.С., Аракчеев Т.П., Дарвиш А. Сходимость численного диаграммного метода нелинейного расчёта стержневых железобетонных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 31–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-31-43

For citation:

Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuev S.V., Hassoun M.S., Arakcheev T.P., Darvish A. Convergence of the numerical diagram method of nonlinear calculation of core reinforced concrete elements. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 31–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-31-43

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-44-54

Холуянова Е.О.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: ekholuyanova@gmail.com

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ТИПОЛОГИИ ЕВРЕЙСКИХ ОБЩИННЫХ ЦЕНТРОВ

Аннотация. В статье рассматривается анализ тенденций развития архитектурной типологии еврейских общинных центров, обоснована актуальность её исследования. Описаны этапы развития архитектурной типологии, на основе графоаналитических схем планировочных решений исторических типов еврейских общинных центров, сделаны выводы о преемственности функционально-планировочной организации религиозного функционально-планировочного компонента еврейских общинных центров.

Изложены выводы анализа опыта реализации еврейских центров, выявляющего основные факторы, влияющие на формирование объёмно-планировочных решений. Рассмотрен характер градостроительного размещения и пешеходной доступности еврейских общинных центров в Санкт-Петербурге.

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта проектирования и реализации таких зданий на современном этапе выявлены особенности функциональной и пространственной организации еврейских общинных центров, сформулированы принципы сводной классификации таких зданий. Показано, что существует зависимость между доминирующим функционально-планировочным компонентом еврейского общинного центра и характером его планировочной организации.

Кратко изложены подходы к рассмотрению построения архитектурного образа еврейского общинного центра с точки зрения морфологии и семиотики. Сформулированы перспективные направления исследований, раскрывающие национальную идентичность через семиотику архитектурного образа еврейского общинного центра.

Ключевые слова: еврейский общинный центр, синагога, типология зданий, функциональное зонирование, семиотика, национальная идентичность.

Введение. Иудаизм является одной из исторических религий в Российской Федерации. По данным переписи 2010 года, евреи составляют 0,16 % от численности населения Российской Федерации (156 801 чел.) и 0,78 % – от числа жителей Санкт-Петербурга (36 570 чел.) [1]. Социологические исследования отмечают, что больше половины евреев соблюдают религиозные традиции и, хотя бы частично, стремятся к поддержанию еврейской идентичности. [2]

Традиционно центром еврейской жизни являлись здания синагог – «домов собраний», являвшихся местом молитв еврейской общины. После Второй мировой войны число синагог начало расти во всем мире. Так с середины XX века, из-за массовой иммиграции, американские еврейские общины значительно расширились и было построено множество новых синагог для их обслуживания [3, 4]. В современных условиях, под воздействием социально-экономических факторов, возникла необходимость в новых функциях: образовательной, досуговой, культурно-просветительской и других. Уже в конце XX века синагоги нового типа, еврейские общинные центры, начали появляться в Америке и Европе [5–7].

Еврейский общинный центр (ЕОЦ, центр) – многофункциональное здание или комплекс,

предназначенные для общественной жизни еврейской общины согласно религиозным традициям иудаизма.

Объектом исследования является архитектурная типология еврейских общинных центров.

Целью исследования является анализ актуальных тенденций развития архитектурной типологии еврейских общинных центров.

Задачи исследования состоят в:

- определении противоречий между существующей типологией еврейских общинных центров и социально-культурными потребностями еврейской общины;
- анализе основных исторических этапов развития культовой архитектуры иудаизма;
- анализе зарубежного и отечественного опыта проектирования и реализации зданий ЕОЦ.

Хронологические рамки исследования включают период с 1990 по 2021 годы, когда многофункциональный тип еврейского общинного центра стал преобладающим [8]. В целом, в мире в данный период появилось более 100 новых зданий еврейских общинных центров (рис. 1).

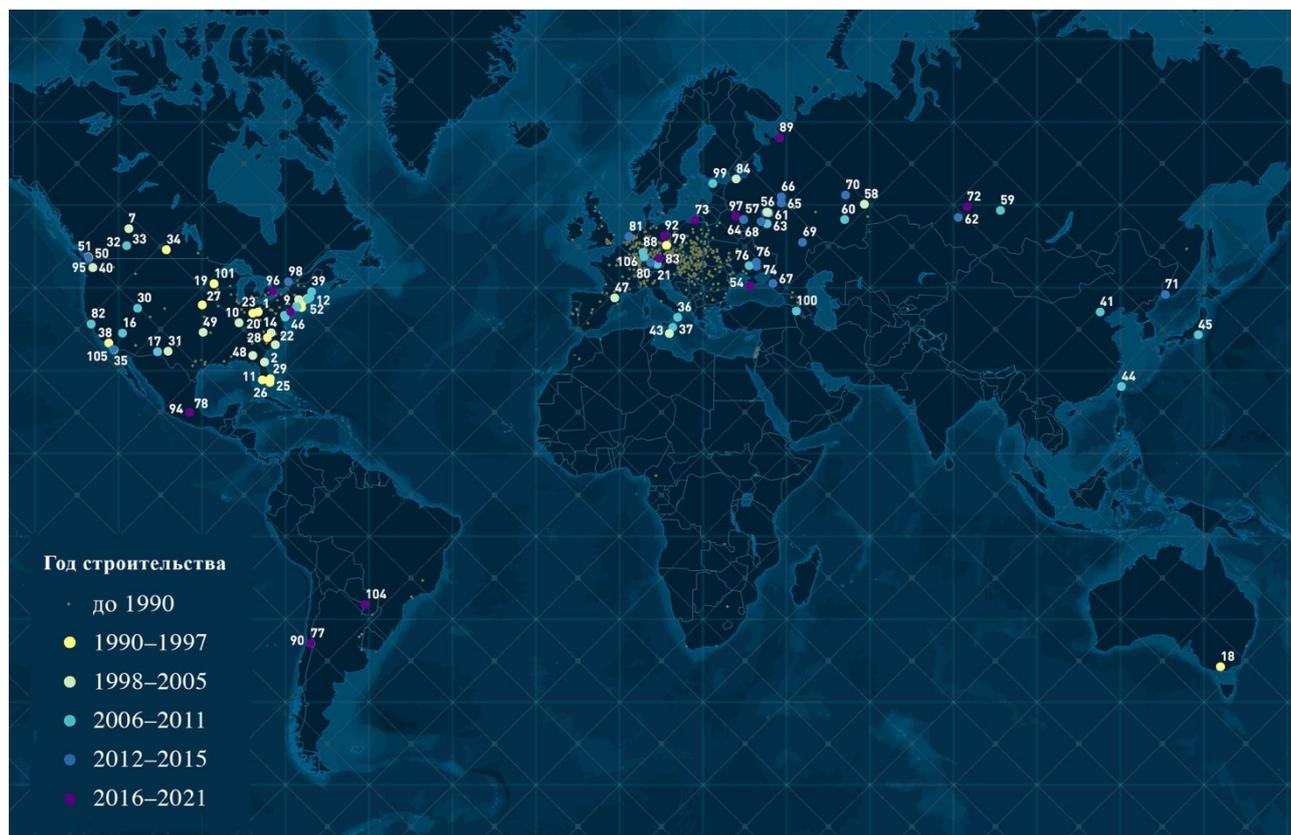


Рис. 1. Размещение ЕОЦ, реализованных с 1990 по 2021 годы.¹

Тенденция к возникновению нового типа еврейских центров в России наблюдается с 2000-х годов, когда Федерацией еврейских общин России (ФЕОР) были сделаны заявления о нехватке синагог в российских городах [9–11].

Основные исследования, посвящённые культурной архитектуре иудаизма, представлены монографиями и публикациями С. Грубера, М. Михальски, С. Кравцова, Г. Шапиро, С. Кадиша, Н. Симхони, Д. Долев, А. Эйзенберга, К. Крински, Р. Вишницер, Р. Кляйна, А. Соколовой, С. Тархановой и др. Указанные работы затрагивают 3 обобщённых тематических поля:

- древние святилища иудаизма: скиния, иерусалимский храм;
- религиозно-законодательная база, на которых основаны архитектурные решения синагог;
- исследование исторических стилей и традиций иудейского зодчества.

Исследований, посвящённых развитию архитектурной типологии еврейских общинных центров на современном этапе, в настоящее время не существует. Стоит отметить, что ряд зданий современной синагогальной архитектуры рассматривается в публицистике: о синагогах XX-го века пишет американские исследователи Самюэль Грубер и Ли Шай Вайсбах, опубликованы интервью немецкого архитектора Мануэля

Герца и статьи Кима де Вилдта о творческих подходах к проектированию современных еврейских общинных центров, в статьях сербского исследователя Джурджии Боровняк. Тем не менее, в рамках комплексного научно обоснованного исследования архитектурная типология современной иудейской архитектуры ранее не рассматривалась.

Целесообразна разработка архитектурной типологии современных синагог — еврейских общинных центров (ЕОЦ) нового типа, отвечающих современным требованиям религиозной и общественной жизни. В таком еврейском общинном центре синтезируются традиционные элементы синагоги и новые функции в целях создания условий для полноценной религиозной и национально-культурной жизни населения, исповедующего иудаизм и идентифицирующих себя с еврейским народом (еврейской общины) [2].

Методика. Для рассмотрения тенденций развития типологии еврейских общинных центров в настоящем исследовании используются следующие методы.

1. Анализ основных исторических этапов развития и выявление на его основе требований, предъявляемых традицией к организации пространств религиозного назначения. Рассмотрены

¹ Все иллюстрации в статье, кроме специального оговоренных, разработаны автором.

исторические этапы её развития, из которых выделено три основных:

– прото-период (эпоха передвижного богослужения),

– эпоха храмовой архитектуры,

– эпоха синагогальной архитектуры.

2. Анализ опыта проектирования в выбранных хронологических границах и выявление основных функционально-планировочных компонентов, входящих в состав еврейских общинных центров на современном этапе. Выделяются морфологические типы объёмно-планировочных решений современных еврейских общественных центров, что рассматривалось автором ранее [2].

3. Анализ градостроительного размещения еврейских общинных центров, рассматривающий характер обеспеченности жилых районов различными функциями и параметры пешеходной доступности таких центров.

4. Анализ семиотики архитектурного образа еврейских общинных центров, позволяющий выявить подходы к формообразованию, выбору строительных и отделочных материалов.

Основная часть.

Анализ этапов развития архитектурной типологии еврейских общинных центров. Первым этапом (прото-периодом) формирования типологии еврейского общинного центра является эпоха передвижного богослужения. Для первых богослужений использовалась легкоразборная конструкция — *мишкан* (др.-евр. מִשְׁכָּן, «обиталище; местопребывание», то же, что др.-греч. σκηνή, скиния, «шатёр; палатка») или *охэл моэд* (др.-евр. מוֹעֵד אֶהֱל, «шатёр свидетельства»), подробно описанная в Торе (книга *Шмот* (др.-евр. שְׁמוֹת — «Вот имена...») – главы 25–31, 35–40). Шатёр *мишкана* представлял собой каркас из деревянных досок, обложенных золотом, покрытый четырьмя покрывалами из виссона. Его устройство позволяло разбирать всю конструкцию на части, пригодные для переноски. Шатёр скинии размещался во дворе, в котором помимо шатра находился также жертвенник (рис. 2).

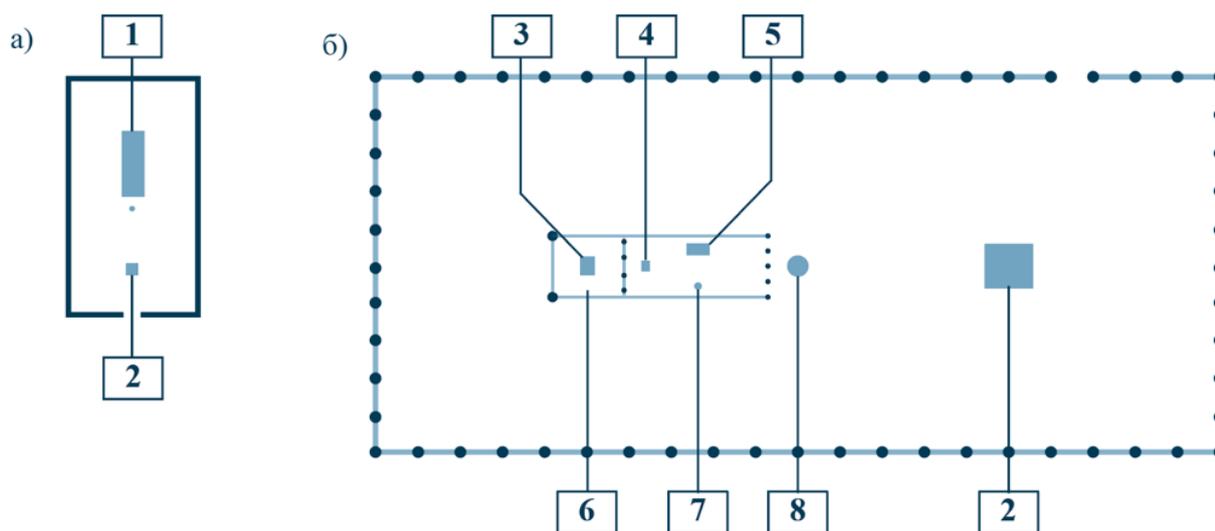


Рис. 2. Планировочная организация ЕОЦ эпохи передвижного богослужения:

а) схема, б) план. Обозначения: 1 – *мишкан*, 2 – жертвенник, 3 – ковчег завета, 4 – жертвенник курения, 5 – *шульхан* (ивр. стол хлебов), 6 – святая святых, 7 – *менора* (ивр. светильник), 8 – умывальник

Эпоха храмовой архитектуры. Выделяют периоды Первого храма (950–586 гг. до н. э.) и Второго храма (516 г. до н. э. – 70 г.). Пространственная организация храмового комплекса в целом развивает планировочную схему прото-периода. В общей композиции комплекса воспроизводится соосное расположение жертвенника и святилища, к дворовой части добавляются вспомогательные помещения. Двор получил разделение на внешний и внутренний (рис. 3). В плане здание Храма было продолговатой формы и состо-

яло из трёх смежных помещений одинаковой ширины — притвора (*улам* — др.-евр. אולם), зала (*хейха* — др.-евр. הֵיכָל или *кодеш* — др.-евр. קֹדֶשׁ) и святая святых (*давир* — др.-евр. דְבִיר или *кодеш а-кодашим* — др.-евр. הַקֹּדֶשִׁים קְדוֹשִׁים). В период Второго храма также выделяется *эзрат нашим* (др.-евр. נְשִׂים עֹזֶרֶת — «женский двор»).

Эпоха синагогальной архитектуры. С началом проживания евреев в диаспоре вне территории Израиля получил развитие тип молитвенного дома, получивший название синагоги. Конструктивные и художественные решения архитектуры

синагог не имели ярко выраженной национальной идентичности и часто соответствовали окружению [12]. При этом значительная часть элементов архитектурного решения синагоги уходила корнями в еврейскую мысль и текстуальную культуру. В архитектуре синагог также нашли отражение детали основанных на книге пророка

Йехезкела графических реконструкций архитектуры Храма, выполненных Хуаном Баутиста Вильяльпандо в 1604 г., Кристианом ван Адрихом в 1584 г. и др. [13, 14]. Таким образом, архитектура синагог развивалась одновременно независимо и параллельно тенденциям в европейской архитектуре [15].

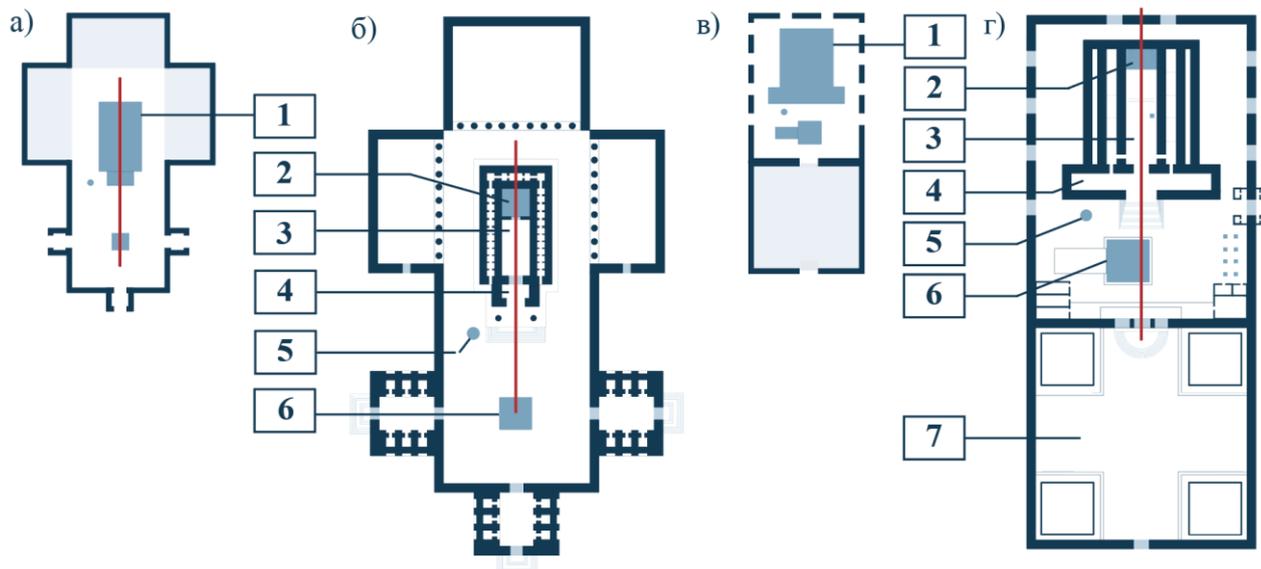


Рис. 3. Планировочная организация ЕОЦ эпохи храмовой архитектуры:

а) схема ЕОЦ периода Первого храма, б) то же, план; в) схема ЕОЦ периода Второго храма, г) то же, план. Обозначения: 1 – святилище, 2 – святая святых, 3 – зал, 4 – притвор, 5 – сосуд омовения, 6 – жертвенник; 7 – женский двор

Синтезируя архитектурные решения различных планировочных типов ЕОЦ синагогального периода в общую планировочную схему (рис. 4), можно выделить следующие основополагающие элементы построения молитвенного зала:

- *бима* (др.-евр. בימה, «сцена») — стол для публичного чтения свитка Торы,
- *арон-кодеш* (др.-евр. ארון הקודש, «Ковчег Святыни») — хранилище для свитков Торы,
- *эзрат-нашим* (др.-евр. ג'זרים עזרת, «женский двор») – отделение для женщин, выполнявшееся в виде притвора или балкона молитвенного зала.

Таким образом, прослеживается преемственное развитие планировочной структуры синагоги, берущее начало от канонов построения *Мишкана*, закреплённых в Торе, к архитектуре Храма, описанной в книге пророка Йехезкела, и далее к архитектуре синагогального периода. Планировочная композиция выстраивается по оси сакрального блока религиозной зоны, развиваясь от оси прото-периода «святая святых – жертвенник», получившей позднее в период синагогальной архитектуры трактовку как ось «*бима – арон-кодеш*» (рис. 5).

Градостроительное размещение. Современная структура градостроительного размещения ЕОЦ свидетельствует о тяготении объектов

еврейской общинной деятельности к кварталам исторического размещения синагог. При этом часто не обеспечивается пешеходная доступность молитвенных залов ЕОЦ для членов еврейской общины, проживающих в отделении от центральных районов.

Анализ размещения ЕОЦ в Санкт-Петербурге показывает, что более половины жилых районов города не обеспечены ЕОЦ в пешеходной доступности (рис. 6), что не отвечает потребностям еврейской общины в посещении молитвенного зала еврейского общинного центра в религиозные праздничные дни и в *шаббат* (ивр. שבת, «покоился, прекратил деятельность» – седьмой день недели в иудаизме, в который Тора предписывает евреям воздерживаться от работы). Необходимость обеспечения именно пешеходной доступности молитвенного зала обусловлена религиозными предписаниями, запрещающими использование транспорта в *шаббат*. Если принять допущение, что места проживания членов еврейской общины не могут быть полностью обусловлены наличием рядом еврейского центра, то становится очевидно, что крупные жилые массивы на юге и севере города не обеспечены еврейскими общинными центрами.

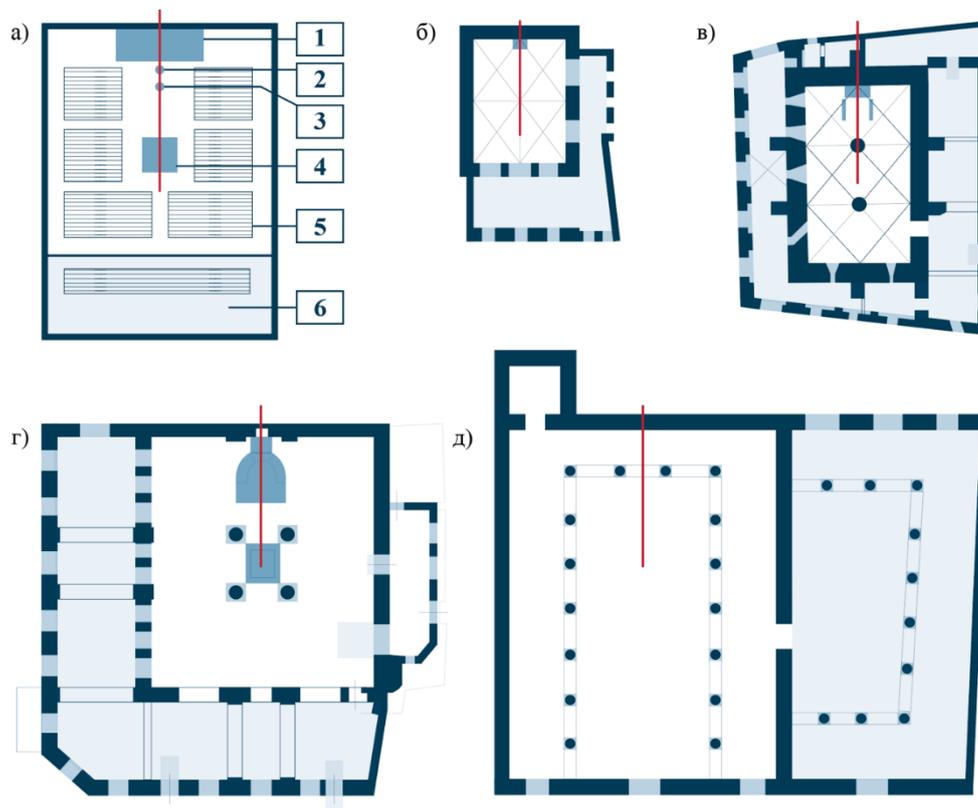


Рис. 4. Планировочная организация ЕОЦ эпохи синагогальной архитектуры:
 а) обобщённая схема, б) бесстолпный тип (синагога Нахмановича) в) двухнефный (двух-, трехстолпный) тип (Староновая синагога в Праге), г) девятипольный (четырёхстолпный) тип (синагога в Вильно), д) базиликальный тип (Галилейская синагога в Тель Хум).

Обозначения: 1 – *арон кодеш*, 2 – *нер тамид*, 3 – *менора*, 4 – *бима*, 5 – сидения, 6 – *эзрат нашим*

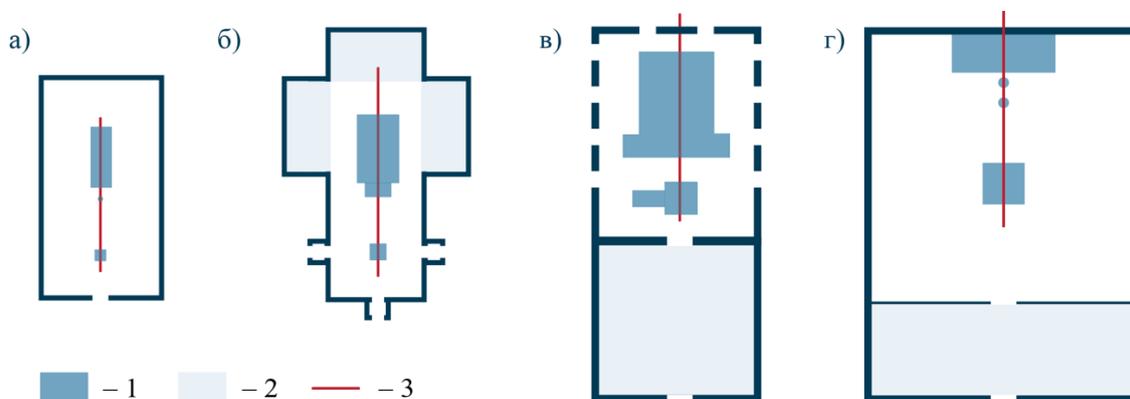


Рис. 5. Развитие функциональной организации ЕОЦ:
 а) прото-период, б) период Первого храма, в) период Второго храма, г) период синагогальной архитектуры.
 Обозначения: 1 – религиозная зона, 2 – женский двор, 3 – композиционная ось «*бима – арон-кодеш*»

Для таких районов необходимо подобрать территорию для размещения ЕОЦ, разработать требования по его функциональному составу и вместимости, предложить варианты объёмно-планировочного решения.

Семиотика архитектурного образа еврейского общинного центра. Объёмно-планировочное решение неразрывно связано с национальной идентичностью и семиотикой архитектурного образа, выраженных в экстерьере и интерьере [11]. Тематические исследования показывают общую тенденцию к абстрактному религиозному

символизму при формулировании нового еврейско-национального визуального канона [19].

Достаточно дискуссионным и многоликим в настоящее время является вопрос идентичности в архитектуре еврейских общинных центров, по-разному трактуемый исследователями данного вопроса. Более того, характер архитектурного решения может иметь и философский аспект поощрения ассимиляции – смотреть в будущее, а не концентрироваться на ужасах прошлого. Этот подход часто встречается в синагогах, построен-

ных в период послевоенной эмиграции в Соединённые Штаты Америки, в новых модернистских синагогах Германии, построенных по модернистским принципам со слабой связью с прошлым. Например, новая синагога в Штутгарте и Еврейский общинный центр в Западном Берлине были спроектированы в современном стиле, но включали в себя остатки руин исторических зданий [7].

Современный архитектурный модернизм и хай-тек с их отказом от историзма и его целью создания универсалистских форм с использованием современных материалов, таких как стекло и сталь, оставлял мало места для выражения еврейской этнической принадлежности или религии.

Это могут быть структурные элементы, такие как план, основанный на шестиконечной звезде, стены в форме скрижалей с Десятью заповедями (как они традиционно представляются) или буквы еврейского алфавита. Он также может включать такие элементы, как надписи из Торы или материалы, напоминающие Иерусалимский известняк.

Особенно интересна трактовка семиотического аспекта архитектурного решения еврейского общинного центра в контексте литургических еврейских текстов. Исследования показывают прямую связь между системой пропорционирования элементов синагог и отдельными стихами молитв, основанную на натуральных обследованиях и *гематрическом* анализе [20].

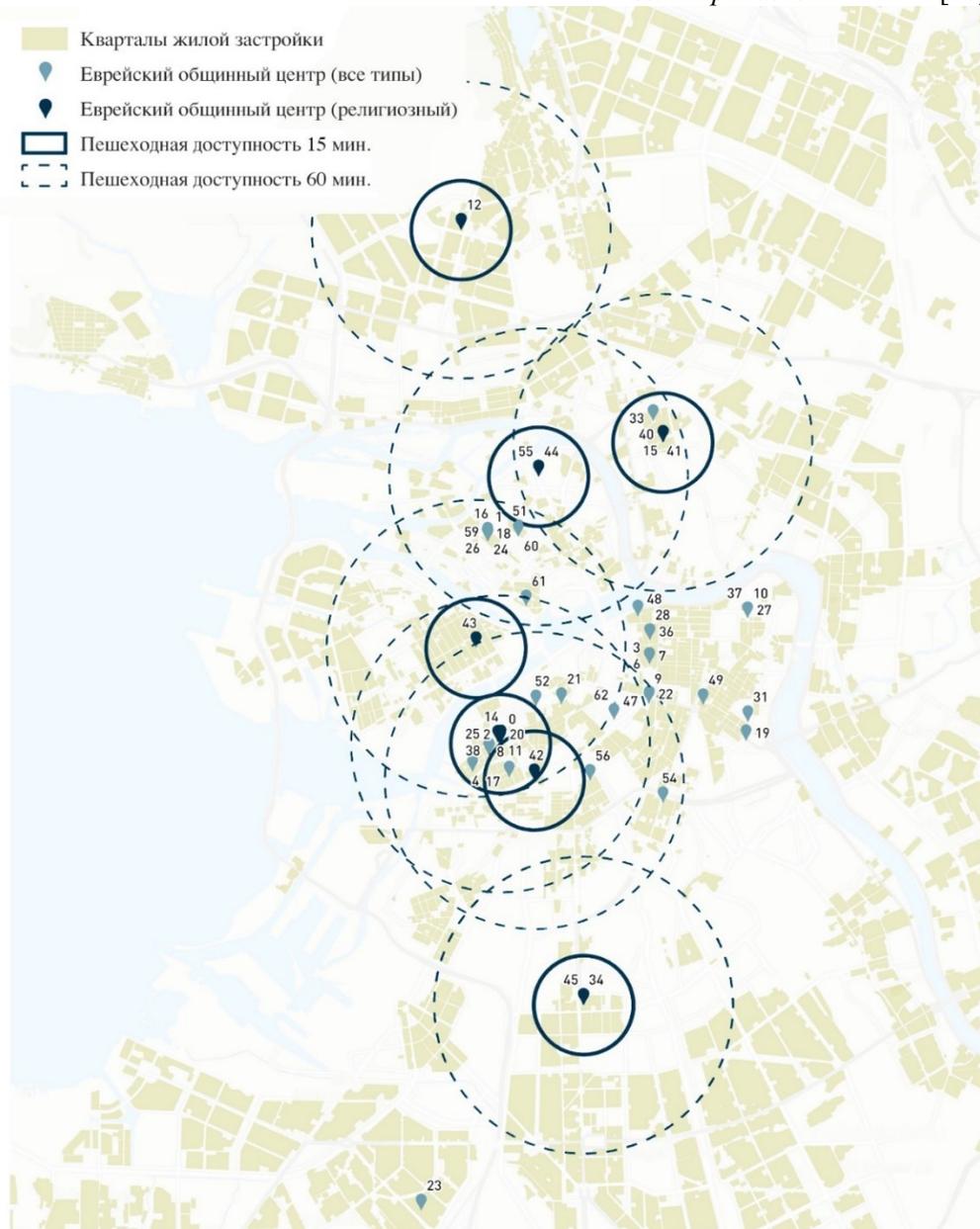


Рис. 6. Размещение и пешеходная доступность ЕОЦ в Санкт-Петербурге

Гематрия (ивр. גימטריה) – особый вид мистического букв, укоренившийся в еврейском языке (в иврите возможна буквенная запись чисел, в чём-

то напоминающая римский способ записи). Метод *гематрии* предполагает, что буквы в слове понимаются как графические знаки чисел.

В проведённых в настоящее время гематрических исследованиях показан лингвистически бинарный характер синагогальной архитектуры, коренящийся в оппозиции экстерьера и интерьера. Так выражения, относящиеся к изгнанию и ностальгии по храму и Иерусалиму, находятся чаще во внешних измерениях (размерном плане экстерьера), тогда как во внутренних измерениях интерьера мы встречаем выражения, восхваляющие Б-га [8].

По аспектам семиотики архитектурных образов еврейских общинных центров автором готовится отдельная статья, раскрывающая современные подходы к национальной идентичности.

Классификация еврейских общинных центров на современном этапе. В зданиях ЕОЦ находит отражение современная общемировая тенденция к усилению принципов полифункциональности общественных зданий [22]. Так, среди ЕОЦ, построенных в период с 1990 года прослеживается преобладание многофункционального типа таких зданий.

В зависимости от локальных функциональных потребностей общины, еврейский общинный центр может состоять из различных функционально-планировочных компонентов (ФПК) – групп помещений, обеспечивающих выполнение определённого функционального процесса (сервисного обслуживания, досуга и др.).

В исследовании выделяются следующие ФПК:

1. Религиозный. Включает помещения для проведения синагогальной службы, традиционных праздников, церемонии бракосочетания, трапезы, совершения омовения и др.

2. Учебно-воспитательный. Включает помещения для размещения организаций образования: учебных классов, кабинетов, помещения физкультурно-оздоровительного и культурно-досугового назначения.

3. Культурно-просветительный. Включает выставочные залы, аудитории, библиотеки, читальные залы, помещения для регистрации, изучения, реставрации и складирования экспонатов.

4. Гостиничный. Включает номера, общественные помещения для проживающих, сервисные и технические помещения гостиничного обслуживания.

5. Административный. Включает помещения предприятий общественного питания, розничной торговли и сервисного обслуживания, гардеробные, а также административные, офисные и служебно-бытовые помещения.

В диссертационном исследовании, послужившем основой настоящей статьи, проведена сводная классификация зданий таких центров, учитывающая совокупность выявленных при анализе примеров реализации ЕОЦ признаков (по доминированию функционально-планировочного компонента, по величине центра, по объёмно-пространственным решениям).

Классификация по функциональному признаку определяется спецификой роли центра в социально-религиозной деятельности еврейской общины, и, как следствие, доминирующему ФПК: образовательный, просветительский, экспозиционный, светский, религиозный (монофункциональный).

В отличие от зданий мусульманских и православных центров, преобладающим направлением в проектировании которых является историзм [23], большинство рассматриваемых в классификации современных еврейских центров соответствуют архитектуре своего времени (рис. 7).

В классификации по объёмно-пространственным решениям выделяются следующие типы планировочного решения: зальный, павильонный, анфиладный, коридорный. Как показывает анализ, для разных ФПК ЕОЦ будут характерны различные планировочные решения (табл. 1), обусловленные спецификой протекающих в них функциональных процессов.



Рис. 7. Классификация ЕОЦ по принципу доминирования функционального компонента:
1) культурно-просветительский², 2) учебно-воспитательный³, 3) религиозный⁴, 4) административный⁵

² Источник: <https://www.dezeen.com/2021/07/01/manchester-jewish-museum-citizens-design-bureau/>

³ Источник: <https://www.dezeen.com/2011/04/29/jewish-community-centre-mainz-by-manuel-herz-architects/>,

⁴ Источник: <https://www.archdaily.com/198818/>

⁵ Источник: <https://archi.ru/projects/russia/5023/zdanie-evreiskogo-sankt-peterburgskogo-obschinnogo-doma-esod>

Таблица 1

Классификация ЕОЦ по характеру планировочного решения

№ п/п	Планировочное решение	Соответствие доминирующему функциональному компоненту			
		Культурно-просветительский	Учебно-воспитательный	Религиозный	Административный
1.	Зальное	да	—	да	—
2.	Павильонное	да	—	да	—
3.	Анфиладное	да	—	—	—
4.	Коридорное	—	да	—	да
5.	Встроенное	—	да	да	да
6.	Встроенно-пристроенное	—	да	да	да
7.	Пристроенное	да	—	—	—

Выводы.

1. В результате комплексного анализа зарубежного и отечественного опыта проектирования и реализации зданий еврейских общинных центров на современном этапе, а также основных исторических этапов развития культовой архитектуры иудаизма, определены тенденции преемственного развития их функционально-планировочной структуры.

2. Традиционный функциональный состав синагоги претерпевает изменения в результате противоречий между исторически сложившейся архитектурно-планировочной структуре синагог и современных потребностях их функциональной организации.

3. Классификация современных еврейских общинных центров отражает их полифункциональность и различный характер объёмно-планировочного решения в зависимости от доминирующей функции.

4. Необходима разработка рекомендаций по выбору рациональных архитектурно-планировочных решений еврейских общинных центров, выраженных в требованиях к функциональной организации и составу основных групп помещений и сформулированных с учётом преемственности национальных традиций, а также градостроительных требований к размещению ЕОЦ в городской структуре.

5. Видится перспективным направление исследований, расширяющее семиотический анализ синагогальной архитектуры и формирующее на его основе уникальную идентичность дизайна экстерьера и интерьера еврейских общинных центров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. De Wildt K., Radermacher M., Krech V., Löffler B., & Sonne W. Transformations of «Sacredness in Stone»: Religious Architecture in Urban Space in 21st Century Germany — New Perspectives in the Study of Religious Architecture // *Religions*. 2019. Vol. 10. № 11. 602. doi:10.3390/rel10110602.
2. Холуянова Е.О., Супранович В.М. Объёмно-планировочные решения современных еврейских общинных центров // *Современные подходы и методики научно-исследовательской работы в архитектуре: Сборник научных трудов по результатам I и II Круглых столов за 2020-2021 годы*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 25–35.
3. Two Hundred Years of American Synagogue Architecture. In: *Catalog of Catalogs Online: A Bibliography of Temporary Exhibition Catalogs Since 1876 that Contain Items of Judaica*. doi:http://dx.doi.org/10.1163/9789004444522_COCO_CC0548.
4. Weissbach L.S. The Architecture of the Bimah in American Synagogues: Framing the Ritual // *American Jewish History*. 2003. Vol. 91. № 1. Pp. 29–51.
5. Borovnjak D. Synagogues in Recent Serbian Architecture // *Serbian Studies: Journal of the North American Society for Serbian Studies*. 2017. Vol. 28 № 1-2, Pp. 127–155. doi:10.1353/ser.2017.0010.
6. Kalmar I.D. Moorish Style: Orientalism, the Jews, and Synagogue Architecture // *Jewish Social Studies*. 2001. Vol. 7. № 3. Pp. 68–100. doi:10.1353/jss.2001.0011.
7. Rosenfeld G.D. Between Memory and Normalcy: Synagogue Architecture in Postwar Germany. In: J. H. Geller & L. Morris (Eds.), *Three-Way*

Street: Jews, Germans, and the Transnational, University of Michigan Press, 2016. Pp. 277–301.

8. Michalski M. Gematria, geometria i inne fenomeny w architekturze judaizmu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2020. doi:10.37190/mmichalski2020

9. Белинцева И.В. Новая Синагога в Кенигсберге: к проблеме восстановления здания в современном Калининграде // Архитектурное наследство. 2007. № 47. С. 243–252.

10. Косенкова Е.В. Особенности реконструкции культовых сооружений на примере новой синагоги Synagogenplatz в г. Майнц (Германия) // Научный альманах. 2019. № 4-3 (54). С. 241–243.

11. Косенкова Е.В. К вопросу о реновации культовых сооружений г. Самары // Научный альманах. 2020. № 10-1 (72). С. 128–130.

12. Kadish S. Constructing Identity: Anglo-Jewry and Synagogue Architecture // Architectural History. 2002. Vol. 45. Pp. 386–408. doi:10.2307/1568790.

13. Kravtsov S. R. Juan Bautista Villalpando and Sacred Architecture in the Seventeenth Century // Journal of the Society of Architectural Historians. 2005. Vol. 64, № 3, Pp. 312–339.

14. Michalski M. Templum Hierosolymitanum – sacred architecture and the Solomon order // Architectus. 2019 Vol. 4. № 60. Pp. 23–36.

15. Michalski M. Architektura judaizmu – Wybrane aspekty zagadnienia na przykładach zachowanych synagog z XVII i XVIII w. z terenu obecnej Polski, praca doktorska, WA Politechniki Wrocław. 2015.

16. Seligman J. Between Yerushalayim DeLita and Jerusalem – The Memorial Inscription from the Bimah of the Great Synagogue of Vilna // Arts. 2020. Vol. 9. 46. doi:10.3390/arts9020046.

17. Kravtsov S.R. Synagogue Architecture of Latvia between Archeology and Eschatology // Arts. 2019. Vol. 8. 99. https://doi.org/10.3390/arts8030099.

18. Weissbach L.S. Buildings Fraught with Meaning: An Introduction to a Special Issue on Synagogue Architecture in Context // Jewish History. 2010. Vol. 25. № 1. Pp. 1–11. doi:10.1007/s10835-010-9125-8.

19. Simhony N. Exceptionally Jewish: Israeli Synagogue Architecture in the 1960s and 1970s // Arts. 2020. Vol. 9. 21. doi:10.3390/arts9010021.

20. Michalski M. Tikkun Chatzot – semiotics of synagogues on the example of the synagogue in Siemiatycze // Architectus. 2021. Vol. 65. № 1. Pp. 3–10. doi:10.37190/arc210101.

21. Еремеева А.Ф. Общественные пространства в структуре многофункционального комплекса: современные тенденции организации // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 5–12. doi:10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12.

22. Косенкова Н.А., Демирова М.А., Косенкова Е. В. Анализ мирового опыта проектирования духовно-просветительских центров исламской культуры // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. № 4 (41). С. 144–151. doi:10.17673/Vestnik.2020.04.17.

Информация об авторах

Холуянова Екатерина Олеговна, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: ekholuyanova@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 17.01.2022 г.

© Холуянова Е.О., 2022

Kholuyanova E.O.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

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

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL TYPOLOGY OF JEWISH COMMUNITY CENTERS

Abstract. *The article discusses the analysis of trends in the development of the architectural typology of Jewish community centers, substantiates the topicality of its study. The stages of development of architectural typology are described, based on graphic-analytical schemes of planning decisions of historical types of Jewish community centers. Conclusions are drawn about the continuity of the functional planning organization of the religious functional planning component of Jewish community centers. The conclusions of the analysis of experience in the implementation of Jewish centers are presented. It reveals the main factors influencing the formation of space-planning solutions. The nature of the town-planning placement and walking distance of*

Jewish community centers in St. Petersburg is considered. Based on the analysis of foreign and domestic experience in the design and implementation of such buildings at the present stage, the features of the functional and spatial organization of Jewish community centers are identified, and the principles of a consolidated classification of such buildings are formulated. It is shown that there is a relationship between the dominant functional and planning component of the Jewish community center and the nature of its planning organization. Approaches to the consideration of the construction of the architectural image of the Jewish community center from the point of view of morphology and semiotics are briefly outlined. Promising areas of research are formulated that reveal national identity through the semiotics of the architectural image of the Jewish community center.

Keywords: Jewish community center, synagogue, building typology, spatial organization, functional zoning, national identity.

REFERENCES

1. De Wildt K., Radermacher M., Krech V., Löffler B., & Sonne W. Transformations of “Sacredness in Stone”: Religious Architecture in Urban Space in 21st Century Germany — New Perspectives in the Study of Religious Architecture. *Religions*, 2019. Vol. 10. No. 11. P. 602. doi:10.3390/rel10110602
2. Kholuyanovа E. O. Space-planning decisions of modern Jewish community centers [Ob'emno-planirovochnye resheniya sovremennykh evrejskikh obshchinnyyh centrov]. *Sovremennye podhody i metodiki nauchno-issledovatel'skoj raboty v arhitekture: Sbornik nauchnykh trudov po rezul'tatam I i II Kruglyh stolov za 2020–2021 gody. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet*, 2021. Pp. 25–35. (rus)
3. Two Hundred Years of American Synagogue Architecture. In: *Catalog of Catalogs Online: A Bibliography of Temporary Exhibition Catalogs Since 1876 that Contain Items of Judaica*. doi:http://dx.doi.org/10.1163/9789004444522_COCO_CC0548
4. Weissbach L.S. The Architecture of the Bimah in American Synagogues: Framing the Ritual. *American Jewish History*, 2003. Vol. 91. No. 1. Pp. 29–51.
5. Borovnjak D. Synagogues in Recent Serbian Architecture. *Serbian Studies: Journal of the North American Society for Serbian Studies*, 2017. Vol. 28. No. 1–2. Pp. 127–155. doi:10.1353/ser.2017.0010
6. Kalmar I.D. Moorish Style: Orientalism, the Jews, and Synagogue Architecture. *Jewish Social Studies*, 2001. Vol. 7. No. 3. Pp. 68–100. doi:10.1353/jss.2001.0011
7. Rosenfeld G.D. Between Memory and Normalcy: Synagogue Architecture in Postwar Germany. In: J. H. Geller & L. Morris (Eds.), *Three-Way Street: Jews, Germans, and the Transnational*, University of Michigan Press, 2016. Pp. 277–301.
8. Michalski M. Gematry geometry and other phenomena in the architecture of Judaism [Gematria, geometria i inne fenomeny w architekturze judaizmu]. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej*, 2020. DOI: 10.37190/mmichalski2020 (pl)
9. Belinceva I.V. New Synagogue in Koenigsberg: to the problem of building restoration in modern Kaliningrad [Novaya Sinagoga v Kenigsberge: k probleme vosstanovleniya zdaniya v sovremennom Kaliningrade]. *Arhitekturnoe nasledstvo*. 2007. No. 47. Pp. 243–252. (rus)
10. Kosenkova E.V. Features of the reconstruction of religious buildings on the example of the new synagogue Synagogenplatz in Mainz (Germany) [Osobennosti rekonstrukcii kul'tovyh sooruzhenij na primere novej sinagogi Synagogenplatz v g. Majnc (Germaniya)]. *Nauchnyj al'manah*. 2019. No. 4–3(54). Pp. 241–243. (rus)
11. Kosenkova E.V. On the issue of renovation of religious buildings in Samara. [K voprosu o renovacii kul'tovyh sooruzhenij g. Samary]. *Nauchnyj al'manah*. 2020. No. 10–1(72). Pp. 128–130. (rus)
12. Kadish S. Constructing Identity: Anglo-Jewry and Synagogue Architecture. *Architectural History*, 2002. Vol. 45. Pp. 386–408. doi:10.2307/1568790
13. Kravtsov S.R. Juan Bautista Villalpando and Sacred Architecture in the Seventeenth Century. *Journal of the Society of Architectural Historians*. 2005. Vol. 64. No. 3. Pp. 312–339.
14. Michalski M. Templum Hierosolymitanum – sacred architecture and the Solomon order. *Architectus*, 2019. Vol. 4. No. 60. Pp. 23–36. doi:10.37190/arc190402
15. Michalski M. Architektura judaizmu — Wybrane aspekty zagadnienia na przykladach zachowanych synagog z XVII i XVIII w. z terenu obecnej Polski, praca doktorska, WA Politechniki Wroclaw. 2015.
16. Seligman J. Between Yerushalayim DeLita and Jerusalem – The Memorial Inscription from the Bimah of the Great Synagogue of Vilna. *Arts*, 2020. Vol. 9. No. 2. 46. doi:10.3390/arts9020046
17. Kravtsov S.R. Synagogue Architecture of Latvia between Archeology and Eschatology.

Arts. 2019. Vol. 8. No. 3. P. 99. <https://doi.org/10.3390/arts8030099>

18. Weissbach L. S. Buildings Fraught with Meaning: An Introduction to a Special Issue on Synagogue Architecture in Context. *Jewish History*. 2010. Vol. 25. No. 1. Pp. 1–11. doi:10.1007/s10835-010-9125-8

19. Simhony N. Exceptionally Jewish: Israeli Synagogue Architecture in the 1960s and 1970s. *Arts*. 2020. Vol. 9. 21. doi:10.3390/arts9010021

20. Michalski M. Tikkun Chatzot — semiotics of synagogues on the example of the synagogue in Siemiatycze. *Architectus*, 2021. Vol. 65. No. 1. Pp. 3–10. doi:10.37190/arc210101

21. Eremeeva, A.F. Public spaces in the structure of a multifunctional complex: current trends in organization [Obshchestvennyye prostranstva v strukture mnogofunkcional'nogo kompleksa: sovremennyye tendencii organizacii]. *Bulletin of Civil Engineers*, 2020. No. 4(81). Pp. 5–12. (rus) doi:10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12

22. Kosenkova N. A. Analysis of the world experience in designing spiritual and educational centers of Islamic culture [Analiz mirovogo opyta proektirovaniya duhovno-prosvetitel'skih centrov islamskoj kul'tury]. *Urban construction and architecture*. 2020. Vol. 10. No. 4 (41). Pp. 144–151. (rus) doi:10.17673/Vestnik.2020.04.17.

Information about the authors

Kholuyanova, Ekaterina O. Postgraduate student. E-mail: ekholuyanova@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya, 4.

Received 17.01.2022

Для цитирования:

Холуянова Е.О. Тенденции развития архитектурной типологии еврейских общинных центров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 44–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-44-54

For citation:

Kholuyanova E.O. Trends in the development of architectural typology of jewish community centers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 7. Pp. 44–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-44-54

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-55-65

Пасечник И.Л.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: pasechnic_spr@inbox.ru

**ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ КВАРТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИСТОРИЧЕСКОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ (НА ПРИМЕРЕ КВАРТАЛА,
ОГРАНИЧЕННОГО МАЛЫМ ПР., 11-ОЙ ЛИНИЕЙ, СРЕДНИМ ПР.,
12-ОЙ ЛИНИЕЙ ВАСИЛЬЕВСКОГО ОСТРОВА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ)**

Аннотация. Исторический центр Санкт-Петербурга представляет собой центр грандиозной агломерации и одного из крупнейших градостроительных объектов в Списке ЮНЕСКО. За годы преэкономического развития города и его окрестностей был сформирован своеобразный генетический код Санкт-Петербурга, включающий как материальные, так и нематериальные составляющие. В международной теории и практике сохранения наследия эти составляющие получили название атрибутов ценности. Рядовая историческая застройка, будучи одним из атрибутов ценности объекта всемирного наследия, не только отражает этапы архитектурно-градостроительного развития территории, но также участвует в формировании гармоничной окружающей среды и является одним из индикаторов ее завершенности. Исторические здания охраняются Законом Санкт-Петербурга № 820-7 «О границах объединенных зон охраны...». В настоящее время разработаны и одобрены Методическим советом Минкультуры России границы исторического поселения федерального значения «г. Санкт-Петербург» и предмет его охраны, в состав которого также входит историческая застройка. В связи с этим методика классификации исторической застройки представляется не просто актуальной, но и необходимой, вне зависимости от того, в рамках какого инструмента она может в дальнейшем использоваться. Методика отталкивается от триады «ценность, целостность, подлинность», которые рассматриваются в контексте значения исторической застройки как атрибута ценности объекта всемирного наследия.

Ключевые слова: объекты культурного наследия, предметы охраны объекта культурного наследия, историческая городская среда, рядовая историческая застройка, ценность, подлинность.

Введение. Историческая городская среда города является неотъемлемой частью его пространственно-композиционной среды, которую необходимо сохранять. При этом необходимо выделять отдельные аспекты и критерии – как особенностей самой среды, так и ее сохранения. Это отмечается многими отечественными и зарубежными специалистами [1, 2].

Специалистами долгое время уделялось особое внимание сохранению объектов культурного наследия. Выделялись критерии их отнесения к объектам культурного наследия: их целостность, характеристики, подлинность. Впоследствии специалисты пришли к мнению, что для сохранения подлинности и целостности самого объекта культурного наследия необходимо сохранять не только памятники и ансамбли, но и объекты рядовой (фоновой) застройки [3–5].

В XX веке идея ценности наследия дополнилась такими категориями как целостность и подлинность. Была выделена трехчастная система – ценность, целостность, подлинность – в рамках которой идет оценка объектов культурного наследия. Система охраны объектов наследия при этом разрабатывалась с учетом категорий ценности. Данный процесс шел постепенно: от объекта к историческому городскому ландшафту [6–8].

Вышеуказанное нашло свое отражение в нормативно-правовых актах в сфере охраны объектов культурного наследия и исторической среды вокруг них, в которых указаны рекомендации. Многие документы направлены на выявление ценных качеств городской среды и способов ее развития, сохранения и регенерации [9–12].

Это вызывает ряд вопросов. Каким образом прописать критерии сохранения исторической среды, позволив ей при этом развиваться? Возможно ли одновременно сохранить и развивать городскую территорию? Допускается ли появление новых объектов в сложившейся исторической среде, и какие допустимы параметры новых включений?

Материалы и методы. Аналитическим методом рассматриваются существующие объекты в рассматриваемом квартале. Сравнительным анализом анализируются имеющиеся карты на данную территорию (рис. 1). Фиксируется существующий характер застройки методом фотофиксации застройки (рис. 2). В результате анализа исторических карт и планов, а также существующего состояния составляется историко-культурный опорный план (рис. 3). В целях моего исследования для анализа сохранения среды и ее возможной регенерации строятся 3д модели строения в квартале (рис. 4) [6, 7, 13, 14].

Основная часть. В том числе для исследования необходимо проанализировать здания, расположенные в квартале, в том числе и объекты культурного наследия. Рассмотрим историю и особенности объектов культурного наследия.

Цель исследования – проанализировать здания, расположенные в рассматриваемом квартале для оценки сохранности исторической среды.

Объект исследования – здания, расположенные в квартале, ограниченном Малым пр., 11-ой линией, Средним пр., 12-ой линией Васильевского острова в Санкт-Петербурге.

Задачи исследования: проанализировать сохранность существующей застройки в квартале,

ограниченном Малым пр., 11-ой линией, Средним пр., 12-ой линией Васильевского острова в Санкт-Петербурге; обозначить ее ценность и общую архитектурную объемно-планировочную завершенность; проанализировать возможность внедрения объекта нового строительства в сложившуюся историческую среду квартала; по результатам анализа предложить возможные критерии для проектирования объекта нового строительства.

Объект Э. Э. Бремме. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 12-я линия, 41.

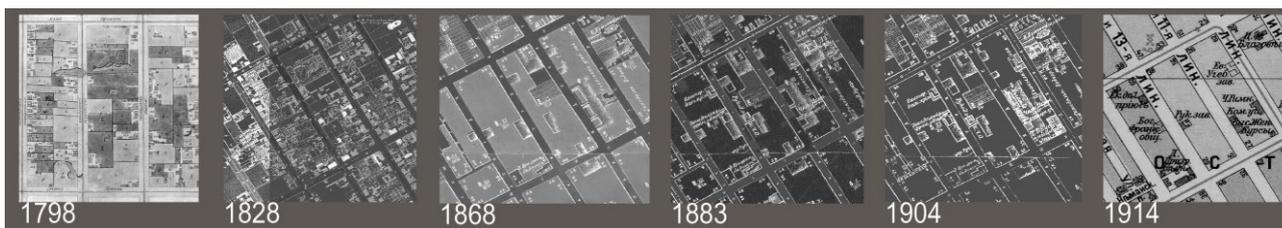


Рис. 1. Исторические карты рассматриваемого квартала (разработка Пасечника И.Л. 2019 г.)



Рис. 2. Современная фотофиксация застройки квартала (разработка Пасечника И.Л. 2019 г.)



Рис. 3. Историко-культурный опорный план квартала (разработка Пасечника И.Л. 2019 г.)



Рис. 4. 3д модель строений в квартале (разработка Пасечника И.Л. 2019 г.)



Рис. 5. Исторические фотографии и чертежи (разработка Пасечника И.Л. 2019 г.)



Рис. 6. Фото объекта (выполнено Пасечником И.Л. в 2019 г.)

Дом – 2-этажный, с мезонином в лицевой части, деревянный, обшитый. Композиция 7-осевого фасада с легкой асимметрией. Архитектурно-пластическое решение включает: окна прямоугольные в наличниках с сандриками (в 1 этаже), полуциркульные под архивольтами на импостах (в мезонине); деревянный дверной козырек на деревянных резных кронштейнах; венчающий карниз профилированный, на модульонах; завершающий мезонин фронтон с круглым окном в тимпане (рис. 5 и 6) [15–17].

История участка. Дом построен в I половине XIX в. В 1851 г. перестроен по проекту арх. Н.П. Гребенки. В 1906 г. реконструирован (арх. В.С. Карпович) с изменением объемно-пространственной композиции, конфигурации крыши и пятна застройки. В 1971г. демонтированы керамические панно (художник П.К. Ваулин).

Градостроительная и архитектурная ценность. Дом – один из немногих сохранившихся образцов деревянной особняковой архитектуры I половины XIX в. Дом формирует историческую застройку 12 линии, гармонично вписываясь в окружающую среду.

Предметы охраны: местоположение особняка, объемно-пространственное решение лицевой части здания, архитектурно-художественное решение лицевого фасада, включая исторический материал.

Дом П.А. Бенигсена. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 12-я линия, 31, 33, 35.



Рис. 7 Фото объекта (выполнено Пасечником И.Л. в 2019 г.)

На участке, объединённом в XVIII в. – каменный 5-этажный на подвале жилой дом, состоящий из 3-х и 5-этажных корпусов, поставленных вплотную друг к другу и объединённых единым оформлением фасадов. Дворовое пространство 3-частное, с двойными изолированными внутренними дворами, проезд в которые осуществляется

через арки в каждом из 3-х корпусов. Композиция 39-осевого фасада 3-частная, симметрично-центричная, с 13-осевым центром и 13-осевыми боковыми частями, имеющими идентичное оформление. Арочные проезды, входные проемы – прямоугольные и полуциркульные. Окна в наличниках с замками и сандриками различной формы. Фасад отличается разнообразием фактурной отделки стен (гладкая и фактурная, имитирующая облицовку камнем штукатурка, рустовка), двухцветным колористическим решением с выделением деталей. В пластическом оформлении использованы орнаментальная лепка (стилизованные пальмы, гирлянды), металлодекор. Фасад завершает карниз на модульонах. Дворовые фасады без элементов декора. Флигеля 5-, 6-этажные, с подвалами и без них. Стены гладкоштукатуренные, без пластического оформления (рис. 7) [14–17].

История участка. Все здания построены в 1901–1902 гг. на месте старой застройки, арх. В.Р. Курзанов.

Градостроительная и архитектурная ценность. Дом – образец доходной жилой постройки начала XX в. в стиле классицистического модерна. Формирует историческую застройку улицы и является ее акцентом, выразительным по силуэту и пластике.

Дом К.Г. Чубакова. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 11 линия, 58.



Рис. 8. Фото объекта (выполнено Пасечником И.Л. в 2019 г.)

На участке – лицевой дом, вошедший во фронт застройки 11 линии, южный и северный флигели первого двора, поперечный флигель, южный и северный флигели второго двора. Застройка периметральная, с двумя внутренними дворами, соединенными арочным проездом. Дом – 6-этажный, на подвале. Стены кирпичные, оштукатуренные. Цоколь гранитный. Композиция 13-осевого фасада носит центрический характер. 3-осевой центр выделен арочным проездом, входным проемом, двойным окном в фигурном наличнике, балконом, раскреповкой карниза, дугообразным аттиком, фланкируемым полукруглыми щипцами и башенками. Архитектурно-пластическое оформление включает трактовку 1 этажа как цокольного, обособленного гранитной облицовкой, разорванной на разных уровнях междуэтажной тягой; разнообразие фактурной обработки стены (гладкая и фактурная штукатурка, керамическая плитка, облицовка диоритом); многоцветное колористическое решение; окна одинарные и двойные. Флигеля – 6-этажные. Стены кирпичные, оштукатуренные, без элементов декора (рис. 8) [14, 17, 18].

История участка. Дом и флигели построены в 1906 г. со сносом старой застройки, арх. М.Ф.Еремеев.

Градостроительная и архитектурная ценность. Дом – образец доходной жилой постройки начала XX в. в стиле модерна. Формирует историческую застройку улицы и является ее выразительной архитектурной доминантой. Флигели формируют объемно-планировочную структуру участка.

Дом И.Л. Львова. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 11 линия, 48.

На участке – лицевой дом, вошедший во фронт застройки 11 линии, южный, западный и северный флигеля. Застройка периметральная с замкнутым внутренним двором. Дом 1 – 6-этажный, без подвала. Композиция 9-осевого фасада симметричная, с центральным полуциркульным парадным входом и прямоугольным эркером, завершенным террасой с пилонами и с двумя симметричными балконами на 2 этаже. Боковые эркеры 3-гранные. В архитектурно-пластическом решении использованы: разнообразие фактурной обработки стен (рустовка, гладкая штукатурка; штукатурка, имитирующая облицовку камнем) и формы проемов (одинарные, двойные, тройные, дугообразнозавершенные, полуциркульные, трапециевидные). Здание завершает дугообразный фронтон. Дворовый фасад без элементов декора. Флигеля – 5-этажные, кирпичные, оштукатуренные, без элементов декора (рис. 9) [14, 19].



Рис. 9. Фото объекта
(выполнено Пасечником И.Л. в 2019 г.)

История участка. Дом построен в 1913 г. по проекту арх. И.А. Претро на месте 2-этажного деревянного на каменном 1-м этаже дома. Флигеля построены в 1903-1908 гг.

Градостроительная и архитектурная ценность. Здание - образец доходного жилого дома начала XX в. в стиле модерн. Формирует историческую застройку улицы и является одной из ее высотных доминант. Флигеля формируют объемно-планировочную структуру участка.

Дом И.Д. Коробкова. Санкт-Петербург, Василеостровский район, 11 линия, 46.

На участке – лицевой дом, вошедший во фронт застройки 11 линии, южный, западный и северный флигели. Застройка периметральная с замкнутым внутренним двором. Дом 1 – 6-этажный, без подвала. Стены кирпичные, оштукатуренные. Цоколь известняковый. 9-осевая композиция фасада симметричная, с центральной осью, акцентированной арочным проездом, облицованным на 1/2 керамической плиткой и балконами 2, 3 этажей. Архитектурно-пластическое решение включает боковые ризалиты с 3-осевыми полукруглыми эркерами, завершенными террасами; боковые парадные входы, расположенные под сводами, опирающимися на пилоны; фактурную и гладкую штукатурку в 3 цвета. Собственно, декоративные элементы: филенки, изогнутая тяга с гирляндами. Завершающий карниз нависающий, раскрепованный, профилированный, с модульонами. Дворовый фасад без элементов декора. Флигеля – 6-этажные, кирпичные, оштукатуренные, без пластического оформления (рис. 10) [14, 20].



Рис. 10 Фото объекта (выполнено Пасечником И.Л. в 2019 г.)

История участка. Все здания возведены в 1901-1902гг. на месте деревянных строений, арх. Д.А. Шагин, В.В. Шауб.

Градостроительная, архитектурная и культурная ценность. Дом - образец доходной жилой

постройки начала XX в. в стиле модерн. Формирует историческую застройку улицы и является одной из ее высотных доминант. Дом связан с именем писателя А.Н. Толстого и историка ист-

кусств профессора Д.В. Айналова. Флигеля формируют объемно-планировочную структуру участка.

Выводы.

1. Новизна исследования заключается в предложенном исследовании квартала и характеристик исторической среды, в то время как в соответствии с действующими нормативно-правовыми документами установлены требования по обобщённому анализу. Данная статья является авторской.

2. По результатам анализа квартала можно сделать выводы о состоянии среды в квартале, в том числе выявить завершённая она или нет, имеются ли места возможной регенерации и даны предложения по ее освоению.

3. По результатам анализа могут быть даны рекомендации, касающиеся каждого отдельно взятого объекта застройки (за исключением объектов культурного наследия и не обладающих архитектурно-градостроительной ценностью неисторических зданий).

4. Параметры возможных преобразований должны быть определены на основе анализа характеристик историко-градостроительной среды конкретного квартала и закреплены в требованиях соответствующего режима использования земель.

5. Требования Закона Санкт-Петербурга № 820-7 «О границах объединенных зон охраны...» являются достаточными для рассматриваемого квартала для сохранения его исторической среды и возможной регенерации.

6. Высотные ограничения в проекте Закона Санкт-Петербурга № 820-7 «О границах объединенных зон охраны...», которые в декабре 2019 года прошли государственную историко-культурную экспертизу, более чётко установили параметры для возможных объектов, что в свою очередь отразилось на сохранении исторической среды.

7. Стоит отметить, что для разработки более качественных и более конкретных режимов зон охраны необходимо изучать каждый квартал с разных аспектов: история застройки, характер среды, состояние и объемно-пространственные характеристики объектов культурного наследия, градостроительная составляющая исследуемого квартала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Девятова Ю.А. Комплексный подход к архитектурному проектированию в исторической городской среде // Архитектон: известия вузов. 2016. № 53. С. 48–52.

2. Абрамов А.И. Философский словарь. М.: Республика, 2001. 719 с.

3. Подъямпольский С.С., Бессонов Г.Б., Беляев Л.А., Постникова Т.М. Реставрация памятников архитектуры: Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1988. 264 с.

4. Рёскин Дж. Семь светочей архитектуры / Пер. с англ. М. Куренной, Н. Лебедевой, С. Сухарева. СПб: Азбука-классика, 2007. 320 с.

5. Крогиус В.Р. Исторические города России как феномен ее архитектурного наследия. М.: Прогресс-Традиция, 2009. 312 с.

6. Методические указания по определению предмета охраны объектов культурного наследия. В 2 кн. М.: ООО «ПФ-Градо», 2011. 53 с.

7. Шевченко Э.А. Методические рекомендации оценки историко-культурной ценности поселения. Применение критериев историко-культурной ценности поселения в оценке недвижимости, расположенной в границах исторического поселения. СПб.: Изд-во «Зодчий», 2014. 264 с.

8. Слабуха А.В. Установление историко-культурной ценности объектов архитектурного наследия (часть 1): организационно-методические проблемы // Человек и культура. 2016. № 6. С. 1–8.

9. Слабуха А.В. Установление историко-культурной ценности объектов архитектурного наследия (часть 2): критерии и метод в современной экспертной практике // Человек и культура. 2016. № 6. С. 9–22.

10. Пасечник И.Л., Марушина Н.В. Категория ценности в теории и практике сохранения исторической городской среды (в контексте сохранения рядовой исторической застройки) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 9-19

11. Philippot P. Historic preservation: philosophy, criteria, guidelines from M.K. Talley, N. Stanley-Price, A. Melucco Vaccaro. Historical and philosophical issues in the conservation of cultural heritage. USA: Getty Institute, 1996. Pp. 268-274.

12. Romualdo Del Bianco Fondazione. How to assess built heritage? Assumptions, methodologies, examples of heritage assessment systems. International Scientific Committee for Theory and Philosophy of Conservation and Restoration ICOMOS, Romualdo Del Bianco Fondazione, Lublin University of Technology. Florence-Lublin, 2015. 267 p.

13. Directeur de publication Duncan Marshall Établir une proposition d'inscription au patrimoine mondial. Manuel de référence. Publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. Deuxième édition, 2011. 142 p.

14. Пыляев М. И. Старый Петербург. Рассказы из былой жизни столицы. М.: Директ-Медиа, 2007. 817 с.

15. Цылов Н.И. Атлас тринадцати частей С.-Петербурга с подробным изображением набережных, улиц, переулков, казенных и обывательских домов Санкт-Петербурга. тип. Штаба Отд. кор. внутр. стражи, ценз, 1849. 392с.

16. Колодезникова К.С. Историческая застройка Санкт-Петербурга. Перечень вновь выявленных объектов, представляющих историческую, культурную ценность. Справочник. «Альт-Софт», 2001. 42с.

17. Гинзбург А.М., Кириков Б.М. Архитекторы-строители Санкт-Петербурга середины XIX-начала XX века. СПб.: Пилигрим, 1996. 395 с.

18. Кириков Б.М., Николаева Т.И. Памятники архитектуры и истории Санкт-Петербурга: Василеостровский район. Санкт-Петербург: Коло, 2006. 688 с.

19. Барановский Г.В. Архитектурная энциклопедия второй половины XIX века. Москва: Изд-во В. Шевчук, 2015. 290 с.

20. Пунин А.Л. Архитектура Петербурга середины и второй половины XIX века. Санкт-Петербург: Крига, 2009. 350 с.

Информация об авторах

Пасечник Игорь Леонидович, аспирант. E-mail: pasechnic_spr@inbox.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4. Генеральный директор. ООО «НИИПИ «Спецреставрация». Россия, 195299, Санкт-Петербург, Киришская ул., д.2, лит. А, оф./пом. Ч. Пом. 4Н 38.2.

Поступила 03.12.2022 г.

© Пасечник И.Л., 2022

Pasechnik I.L.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: pasechnic_spr@inbox.ru

**SPECIFIC ISSUES FOR THE RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS
OF THE BLOCKS OF THE HISTORICAL URBAN ENVIRONMENT
(ON THE EXAMPLE OF THE BLOCK BOUNDED BY MALIY PR., 11TH LINE,
SREDNIY PR., 12TH LINE OF VASILYEVSKY ISLAND IN ST. PETERSBURG)**

Abstract. *The historical center of St. Petersburg is a center of huge agglomeration and one of the largest urban development sites on the UNESCO List. Over the years of the successive development of the city and its surroundings, a unique special code of St. Petersburg is formed and it includes both tangible and intangible components. In international theory and practice of heritage preservation, these components named the attributes of value. Ordinary historical buildings as one of the attributes of the outstanding universal value of World Heritage Site in the same time can transfer us the stages of architectural and urban development of the territory and continue to participate in the formation of a harmonious environment and is one of the most important indicators of its completeness. Historic buildings in St. Petersburg are preserved by St. Petersburg Law № 820-7 "About the boundaries of the united protection zones of cultural heritage sites ...". Currently, the borders of the historical settlement "St. Petersburg" and its protection value, which also includes historical buildings have been developed and approved by the Methodological Council of the Ministry of Culture of Russia. In this case, it seem that the methodology for classification of historical buildings not only relevant, but necessary, and it does not matter what kind of legal instrument for historic building preservation will be taken in future. This methodology is based on three main principles "value, integrity, authenticity", which are considered in the context of the significance of historical development as an attribute of the outstanding universal value of a World Heritage site.*

Keywords: *cultural heritage sites, protection value of the cultural heritage site, historical urban environment, ordinary historical buildings, value, authenticity.*

REFERENCES

1. Devyatova Yu.A. An integrated approach to an architectural project in a historic urban environment. [Kompleksnyj podhod k arhitekturnomu proektirovaniyu v istoricheskoy

gorodskoj srede] Architecton: University News. 2016. No. 53. Pp. 48–52. (rus)

2. Abramov A.I. Philosophical Dictionary. [Filosofskij slovar']. M.: Respublika, 2001. 719 p. (rus)

3. Podyampolsky S.S., Bessonov G.B., Belyaev L.A., Postnikova T.M. Restoration of

architectural monuments [Restavraciya pamyatnikov arhitektury]. M.: Stroyizdat, 1988. 264 p. (rus)

4. Ruskin J. Seven Lights of Architecture [Sem' svetochej arhitektury]. Transl. from English M. Kurennoy, N. Lebedeva, S. Sukharev. St. Petersburg: ABC classic, 2007. 320 p. (rus)

5. Krogius V.R. Historical cities of Russia as a phenomenon of its architectural heritage [Istoricheskie goroda Rossii kak fenomen ee arhitekturnogo naslediya]. M.: Progress-Tradition, 2009. 312 p. (rus)

6. Guidelines for determining the subject of protection of cultural heritage [Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu predmeta ohrany ob"ektov kul'turnogo naslediya] M.: PF-Grado LLC, 2011. 53 p. (rus)

7. Shevchenko E.A. Guidelines for assessing the historical and cultural value of a settlement. Application of the criteria of historical and cultural value of a settlement in the assessment of real estate located within the boundaries of a historical settlement [Metodicheskie rekomendacii ocenki istoriko-kul'turnoj cennosti poseleniya. Primenenie kriteriev istoriko-kul'turnoj cennosti poseleniya v ocenke nedvizhimosti, raspolozhennoj v granicah istoricheskogo poseleniya]. SPb.: Edition "Architect", 2014. 264 p. (rus)

8. Slabukha A.V. Establishing the historical and cultural value of objects of architectural heritage (part 1): organizational and methodological problems [Ustanovlenie istoriko-kul'turnoj cennosti ob"ektov arhitekturnogo naslediya (chast' 1): organizacionno-metodicheskie problemy]. Man and Culture. 2016. No. 6. Pp 1–8. (rus)

9. Slabukha A.V. Establishing the historical and cultural value of objects of architectural heritage (part 2): criteria and method in modern expert practice [Ustanovlenie istoriko-kul'turnoj cennosti ob"ektov arhitekturnogo naslediya (chast' 2): kriterii i metod v sovremennoj ekspertnoj praktike]. Man and Culture. 2016. No. 6. Pp. 1–8. (rus)

10. Pasechnik I.L., Marushina N.V. The value category in the theory and practice of preserving the historical urban environment (in the context of preserving ordinary historical buildings) [categoriya cennosti v teorii i praktike sohraneniya istoricheskoy gorodskoj sredy (v kontekste sohraneniya ryadovoj istoricheskoy zastrojki)]. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. Vol. 21. No. 3. Pp. 9–22. (rus)

11. Philippot P. Historic preservation: philosophy, criteria, guidelines from M.K. Talley, N. Stanley-Price, A. Melucco Vaccaro. Historical and philosophical issues in the conservation of cultural

heritage. USA: Getty Institute, 1996. Pp. 268–274. (rus)

12. Romualdo Del Bianco Fondazione. How to assess built heritage? Assumptions, methodologies, examples of heritage assessment systems. International Scientific Committee for Theory and Philosophy of Conservation and Restoration ICOMOS, Romualdo Del Bianco Fondazione, Lublin University of Technology. Florence-Lublin, 2015. 267 p. (rus)

13. Directeur de publication Duncan Marshall. Établir une proposition d'inscription au patrimoine mondial. Manuel de référence. Publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. Deuxième édition, 2011. 142 p. (rus)

14. Pylyayev M.I. The forgotten past of the surroundings of St. Petersburg [Rasskazy iz byloj zhizni stolicy] L.: Lenizdat, 2007. 817 p. (rus)

15. Tsylov N.I. Atlas of thirteen parts of St. Petersburg with a detailed image of embankments, streets, alleys, bureaucratic and philistine houses St. Petersburg. [Atlas trinadcati chastej S.-Peterburga s podrobnym izobrazheniem naberezhnyh, ulic, pereulkov, kazennyh i obyvatel'skih domov Sankt-Peterburg]. type. of the Headquarters of the Department. cor. ext. guards, censor, 1849. 392 p. (rus)

16. Kolodeznikova K.S. Historical buildings of St. Petersburg. The list of newly identified objects of historical, cultural value [Istoricheskaya zastrojka Sankt-Peterburga]. Perechen' vnov' vyyavlennyh ob"ektov, predstavlyayushchih istoricheskuyu, kul'turnuyu cennost'. Directory. "Alt-Soft", 2001. 42 p. (rus)

17. Ginzburg A. M., Kirikov B. M. Architects-builders of St. Petersburg in the middle of the XIX-early XX centuries [Arhitektory-stroiteli Sankt-Peterburga serediny XIX-nachala XX veka]. SPb.: Pilgrim, 1996. 395 p. (rus)

18. Kirikov B. M., Nikolaev T. I. Monuments of architecture and history of St. Petersburg: Vasileostrovsky district [Pamyatniki arhitektury i istorii Sankt-Peterburga: Vasileostrovskij rajon. Sankt-Peterburg]. St. Petersburg: Kolo, 2006. 668 p. (rus)

19. Baranovskiy G. V. Architectural Encyclopedia of the Second Half of the 19th Century [Arhitekturnaya enciklopediya vtoroj poloviny XIX veka]. Moscow: V. Shevchuk Publishing House, 2015. 290 p. (rus)

20. Punin A. L. Architecture of St. Petersburg in the middle and second half of the XIX century. [Arhitektura Peterburga serediny i vtoroj poloviny XIX veka] St. Petersburg: Kruga, 2009. 350 p. (rus)

Information about the authors

Pasechnik, Igor L. Post-graduate student. E-mail: pasechnik_spr@inbox.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeiskaya, 4.

Received 03.12.2022

Для цитирования:

Пасечник И.Л. Особенности изучения квартальных характеристик исторической городской среды (на примере квартала, ограниченного Малым пр., 11-ой линией, Средним пр., 12-ой линией Васильевского острова в Санкт-Петербурге) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 55–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-55-65

For citation:

Pasechnik I.L. Specific issues for the research of the characteristics of the blocks of the historical urban environment (on the example of the block bounded by Maliy pr., 11th line, Sredniy pr., 12th line of Vasilyevsky Island in St. Petersburg). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 55–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-55-65

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-66-77

***Рощупкина О.Е., Перькова М.В.**¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого³Российский университет Дружбы Народов

*E-mail: olyarossof@gmail.com

РАЗВИТИЕ ЗАПОВЕДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В РОССИИ В XVI–XXI ВВ.

Аннотация. Рассмотрено развитие заповедного дела в исторической ретроспективе с XVI в. по настоящее время. В результате изучения архивных источников, исследований исследователей-смежников (географов, историков, биологов, экологов, специалистов в области заповедного дела) выявлено, что развитие заповедных территорий в России происходило в пять этапов. На I этапе (XVI–XVII вв.) рассматривается формирование общего представления о ценности нетронутых природных комплексов, что связывалось с духовной и религиозной заповедностью территорий. На II этапе (конец XIX–начало XX вв.) изучается организация и становление первых заповедников. На третьем этапе (середина XX в. – Великая Отечественная война и послевоенное время) изучается функционирование заповедников, происходившее в условиях их массовой ликвидации в военное и послевоенное время. Четвертый этап (конец XX в.) можно охарактеризовать как окончательное становление заповедного дела в качестве уникальной системы заповедников России, изучаются особенности данного этапа. На V этапе (начало XXI в. по настоящее время) развитие заповедников рассматривается со стороны актуализации сохранения естественных природных комплексов, а также популяризации экологического туризма через формирование научных и туристско-рекреационных кластеров на базе ООПТ и привлекающих к ним территорий.

Ключевые слова: заповедные территории, особо охраняемые природные территории, градостроительное развитие, заповедное дело, экологический туризм.

Введение. Рассматривая развитие заповедных территорий в исторической динамике, можно выявить их неравномерное, а порой и регрессивное развитие. Это связано с особенностями экономического, политического и социального развития страны в целом. В большей степени это проявилось в финансовой поддержке особо охраняемых природных территорий (ООПТ), что в свою очередь привело к снижению их привлекательности в качестве объектов научных исследований, значительному сокращению площадей ООПТ, а местами к их утрате.

В настоящее время заповедные территории занимают 14 % площади РФ [11] и являются неотъемлемой частью природного каркаса регионов. По своей сути ООПТ – один из важнейших элементов природного каркаса для поддержания устойчивого функционирования экологических систем. ООПТ обеспечивают биологическое разнообразие, а также выступают эталонами нетронутой природы для возможности оценки антропогенного воздействия. Развитие и сохранение ООПТ – одна из важнейших задач градостроительной деятельности и управления развития территорий. Вследствие этого важно понимать исторические предпосылки становления заповедных территорий в России для их дальнейшего сохранения и укрепления.

Материалы и методы. В исследовании анализируется процесс становления заповедных тер-

риторий России. Рассматриваются архивные документы, материалы исследователей-смежников – географов, историков, биологов, экологов, специалистов в области заповедного дела. Применяется сравнительный анализ материалов для выявления исторических этапов их развития. Теоретическую основу работы составляют избранные труды А.А. Чибилёва [25–28], касающиеся развития заповедных территорий, работы Н.Ф. Реймерса [16] и Ф.Р. Штильмарка [16, 30], Б.П. Дитмара [5], А.А. Тишкова [21–23] и других исследователей по соответствующей тематике.

Основная часть. В результате изучения и сравнительного анализа архивных документов, материалов исследователей-смежников – географов, историков, биологов и экологов развитие заповедных территорий в России можно разделить на 5 основных этапов. Рассмотрим их в исторической ретроспективе.

I этап. XVI–XVII вв. – предпосылки становления заповедного дела.

Предпосылки изъятия различных природных территорий и объектов из процессов народнохозяйственной деятельности, а также придание таким территориям и объектам статуса охраняемых известно еще с глубокой древности. Первоначально запрет на различные виды деятельности связывался с духовными началами, особенностями религии и так далее. Например, некоторые места и объекты природы могли считаться

вместилищем духа, его физическим воплощением. Такое религиозное отношение к природе приводило к формированию понятия о святости места или объекта, что становилось причиной религиозного поклонения и, как следствие, обеспечивало сохранность природной территории.

Во времена правления Всеволода и Владимира на Руси были заложены первоначальные истоки заповедного дела. В процессе становления классового расслоения общества, при котором население делилось на высшие (дворянство, духовенство и т.д.) и низшие (крестьяне, мещане и т.д.) сословия, на Руси стали создаваться прообразы охотничьих заказников. Они служили местом для охоты знатных вельмож и вождей. К таким территориям можно отнести охраняемые урочища, которые предполагались для пользования исключительно князьями. Например, организованные под Киевом в конце XI в. при правлении князя Владимира Мономаха «Зверинец», урочище Соколий Рог [10]. В дальнейшем, в соответствии с указом князя Даниила Галицкого, был создан «великий заповедник у межах сучасных» Беловежской и Цуманской пуш, в котором было введено ограничение на добычу зубров [26]. В настоящее время на этом месте действует биосферный резерват Беловежская пуца.

В период царствования А.М. Романова с 1645 по 1676 гг., возникло такое понятие, как «государевы заповедные леса». Вокруг г. Москва была сформирована сеть территорий с особым режимом пользования, для которых был характерен запрет на охотничью деятельность, а также действовали жесткие ограничения на различные виды хозяйственной деятельности. В настоящее время сеть этих территорий представлена в виде городских парков г. Москва – парки Останкино, Сокольники, Измайлово, Кунцево [4].

Ограничение различных видов деятельности на некоторых территориях было связано не только с религиозными началами, охотой или понятием заповедности. Различные природные комплексы с подходящим характером ландшафта использовались в качестве естественной преграды в ходе военных действий, как препятствие на пути степных кочевников и так далее. Одним из таких комплексов является засечная черта, которая представляла собой непрерывную систему лесных массивов, оврагов, рек, лесных завалов, рвов и так далее. Кроме того, хозяйственная деятельность в границах засечной черты запрещалась, а лесу придавался статус заповедного. Таким образом, территории, в границах которых исторически проходила засечная черта, в последующем стали базой для формирования на их основе заповедников. Одним из примеров заповедника, организованного на основе засечной черты,

является государственный природный заповедник Калужские засеки, расположенный в Калужской области.

Продолжительное время заповедность на Руси активно связывалась с мероприятиями по охране корабельных лесов. В целях сохранения высококачественного леса для кораблестроения, Петр I в 1802 г. учредил заповедные зоны для рубок лесов в 55 км от берегов крупных рек, 16,5 км – от малых [29]. Таким образом, в период правления Петра I, в котором в том числе строго контролировалось использование лесов, предназначенных для судостроения, началось становление лесного хозяйства и развитие территориальной охраны природы [26].

II этап. Конец XIX-начало XX вв. – начальный этап становления заповедного дела.

В конце XIX века возникли первые заповедники частного характера. В 1886 г. на основе земель графа Дзедушицкого был создан резерват «Памятка Пеняцька». Главной целью резервата стало проведение исследований для сохранения исторического букового леса и мест гнездования орлана-белохвоста [2]. Также князем Карамзиным в границах его владений был наложен режим заповедности на 600 га степи Бугурусланского уезда [5]. Еще одним примером частного заповедника являлся заповедник во владениях графа Шереметьева – «Заказная роща» в Борисовском имении. Первое упоминание «Заказной рощи» встречается в различных источниках, начиная с XIX в. Сейчас на ее основе действует один из участков ГПЗ «Белогорье» Белгородской области, который носит название «Лес на Ворскле».

В 1845 г. появились так называемые «заповедные имения». Они возникли на основе удобной нераздельной земли (размеры которой могли составлять от 10 до 100 тысяч десятин), которая переходила в дворянских родах при особом порядке наследования [8]. В дальнейшем, в результате произошедшей крестьянской реформы 1845 года, многие территории, неудобные для сельского хозяйства, перешли в пользование крестьянам. Это привело к значительному снижению количества степных и лесостепных территорий, которые сохранились в изначальном виде только на территориях, принадлежащих дворянам (в заповедных имениях). Таким образом, в конце XIX в. сложилась сеть нетронутых степных участков, что стало отправной точкой для развития движения, направленное на то, чтобы создавать государственные заповедники.

В 1895 г. ученым В.В. Докучаевым была выдвинута идея, в которой предлагалось организовывать степные территории в качестве сети степных целинных заповедников. На этих террито-

риях предлагалось размещать научно-исследовательские станции, которые представляли собой базу для проведения мероприятий по наблюдению и изучению различных природных процессов. В дальнейшем идеи по организации заповедных территорий В.В. Докучаева стали воплощаться на практике. В 1898 г. на землевладениях Ф.Э. Фальц-Фейна на юге Херсонской губернии, а также в границах заповедных имений дворян многих губерний (Тамбовской, Харьковской, Воронежской и других) появились первые степные заповедники [25]. Преимущественно эти заповедники располагались на степных территориях и носили частный характер. Таким образом, понятия «заповедный» и «заповедник» постепенно становились теми значениями, которые можно принять близкими к существующим в настоящее время [28].

В начале XX в. в России существовало несколько частных степных заповедников – степные участки в имении А.Н. Карамзина в Бугурусланском уезде Самарской губернии, на землях графини С.В. Паниной в Валуйском уезде Воронежской губернии [25]. Под эгидой Постоянной Природоохранительной комиссии ИРГО в начале XX в. свою работу осуществляли различные специализированные экспедиции, в чью задачу входил сбор материалов для природоохранных территорий. В 1915–1916 гг. были представлены обоснования для формирования таких заповедников, как «Кедровая падь», «Саянский», «Баргузинский». В итоге официальный статус из вышеперечисленных заповедников смог получить один – «Баргузинский», образованный в 1917 г. Именно с этого времени ведется официальный подсчет практического заповедного дела России [26].

Предпосылки к становлению заповедных территорий в той форме, в которой они действуют сейчас, создание ООПТ и планы по их перспективному развитию были заложены в 1917 г. на основе документа, который называется «Первый проект географических заповедников». Автором является В.П. Семенов – Тянь-Шанский. Окончательное решение об учреждении заповедных территорий было принято в 1920 году. За образец формирования территорий был принят опыт формирования американских национальных парков. Но в отличие от национальных парков, в которых охрана природы изначально была второстепенной задачей, призванной для удержания высокого уровня туристической привлекательности [18], при организации заповедных территорий в СССР основной акцент делался на природоохранную и научно-исследовательскую

функции. При ООПТ организовывалась соответствующая инфраструктура. Создавались пункты для различных полевых исследований; лесостепные, зоопсихологические, метеорологические и прочие виды научно-исследовательских станций; природоведческие музеи и прочее.

Множество различных юридических документов и постановлений, которые стали основанием для организации и дальнейшей деятельности заповедников Советского Союза до 1930 г., базировались на принципах, разработанных Г.А. Кожевниковым [28]. Эти принципы затрагивали положения о неприкосновенности заповедных территорий, созданных «навечно». Также в науку Г.А. Кожевниковым было введено понятие о заповедниках как эталонах природы, «которых не будет касаться рука человека» [6].

III этап. Середина XX в. – Великая Отечественная война и послевоенное время.

В годы Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) развитие заповедного дела в СССР пережило резкий спад. Несмотря на то, что в военные годы заповедники, не находившиеся в зоне оккупации и боевых действий, продолжали свою деятельность, многие заповедные территории пострадали. Лесные массивы шли на пиломатериалы, заповедные земли использовались высокими армейскими чинами для охоты, а также преобразовывались в укрепрайоны.

В 1951 г. согласно распоряжению И.В. Сталина, был подготовлен проект ликвидации многих заповедников, которые в результате проверки В.Н. Меркуловым были определены как «утратившими свое значение и не имеющими научной и культурной ценности» и «сеть заповедников и их размеры должны быть пересмотрены» [9]. В итоге в период правления И.В. Сталина были закрыты 88 заповедников. К 1953 году в СССР осталось всего 39 заповедников. Пережив небольшой подъем после смерти И.В. Сталина (благодаря деятельности Комиссии по охране природы при АН СССР), заповедное дело вновь пережило спад в развитии. В 1961 г. было разрешено использовать заповедники для хозяйственных нужд. По инициативе Н.С. Хрущева, в СССР система заповедников трансформировалась, и в РСФСР полностью «упраздняются» пять заповедников, реорганизуются четыре, территория еще двух существенно сокращается [20]. Тем не менее, в 1962 г. было принято положение, согласно которому заповедникам был снова возвращен статус учреждений, чьей приоритетной деятельностью являлось осуществление природоохранной, научной и исследовательской деятельности (рис. 1).

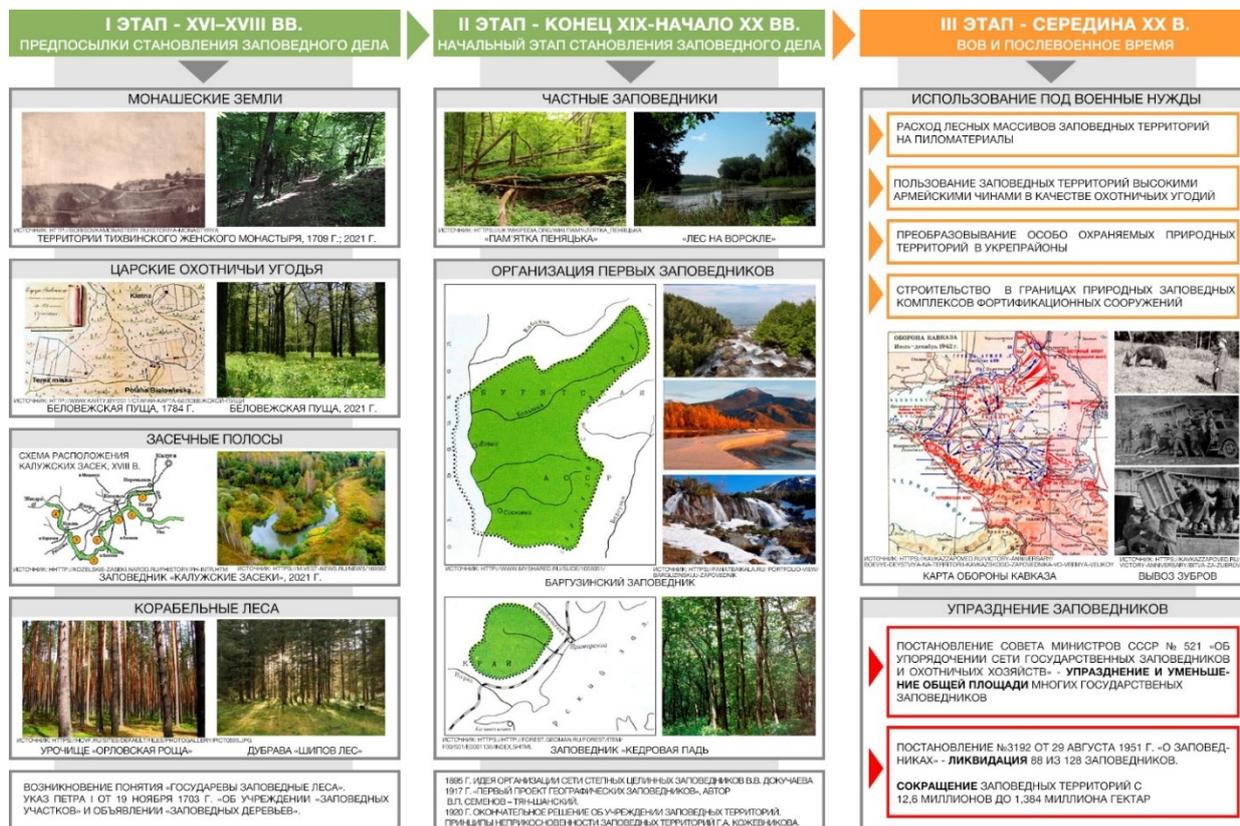


Рис. 1. Этапы развития заповедных территорий в России. I, II, III этапы развития.

Сост. Рошупкина О.Е.

IV этап. Конец XX в. Становление заповедного дела.

В конце XX в. произошло окончательное становление заповедного дела. Сформировалась уникальная система охраняемых природных территорий (заповедная сеть), по своей идеологии и задачам принципиально отличающаяся от системы национальных парков большинства стран мира [7]. В 1979 г. Госпланом РСФСР была утверждена «Схема рационального размещения государственных заповедников, заказников, спортивных и промысловых охотничьих хозяйств в РСФСР на период до 1990 года». Начиная с этого времени, было создано множество заповедников: Байкальский заповедник (1969 г.), Большехецирский (1963 г.), Висимский (1971 г.), Пинежский (1974 г.), Кабардино-Балкарский (1976 г.), Дальневосточный морской (1978 г.) и другие заповедники [22].

С 80-х годов XX в. деятельность заповедников была сосредоточена на осуществлении различных программ, связанных с реализацией мероприятий по экологическому просвещению. В связи с этими мероприятиями возникла идея формирования экологических троп и музеев природы в границах территории заповедников. Целевой аудиторией, для которой подготавливался эколого-просветительский материал, являлись школьники и студенты [24].

В 1986 г. Комиссия по охране окружающей среды Президиума Совета Министров СССР одобрила «Перспективную сеть организации государственных заповедников и национальных парков в СССР на период до 2000 года» [22]. В это время сети особо охраняемых природных территорий различного уровня (федерального и регионального) начинают активно развиваться. Незадолго до распада Советского Союза, в 1990 г. Государственным комитетом СССР по охране природы был одобрен проект «Программы создания общесоюзной системы особо охраняемых природных территорий». В этот проект были включены «старые» перечни государственных заповедников и национальных парков, предлагаемых для организации в РСФСР на период до 2000 г. [21]. Также в это время были сформированы и воссозданы многие заповедники: Байкало-Ленский (1986 г.), Болоньский (1997 г.), Даурский (1987 г.), Оренбургский (1989 г.) и другие [23].

В 1994 г. для исполнения Указа Президента России от 2 октября 1992 г. № 1155 «Об особо охраняемых природных территориях Российской Федерации» был подготовлен новый «Перечень государственных природных заповедников и национальных природных парков, рекомендуемых для организации на территории Российской Федерации в 1994-2005 годах» [23]. Кроме того,

принятый от 14 марта 1995 года федеральный закон №33 «Об особо охраняемых территориях» сыграл большую роль в развитии заповедного дела РФ. Согласно данному закону, различные государственные природные заповедники по своей сути представляют собой учреждения с приоритетом к природоохранной деятельности;

деятельности, направленной на научные исследования, обеспечивающие устойчивое функционирование природных систем; деятельности, связанной с формированием у населения правильного природного восприятия на основе сохранности природных комплексов (рис. 2).

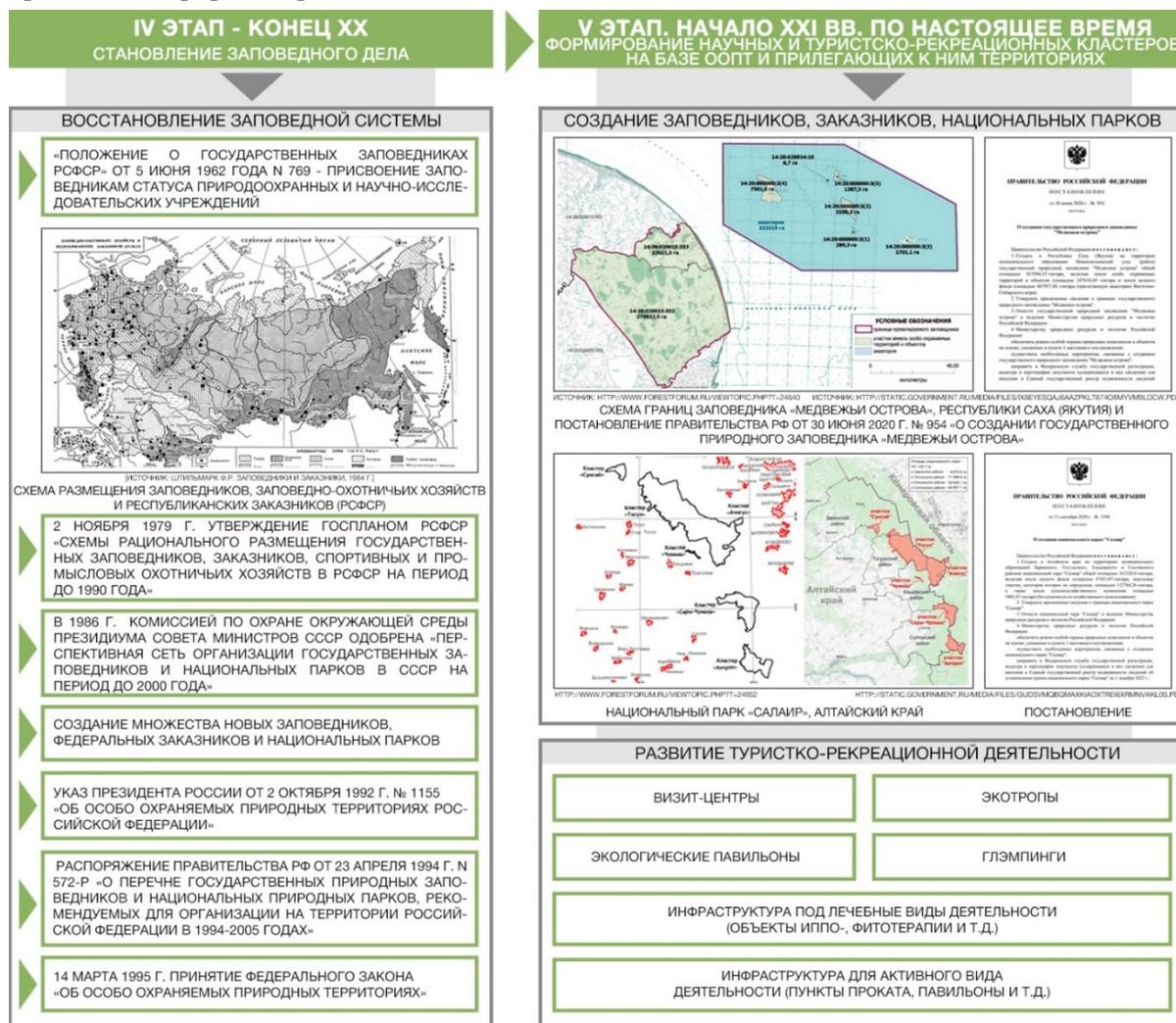


Рис. 2. Этапы развития заповедных территорий в России. IV, V этапы развития. Сост. Рощупкина О.Е.

V этап. Начало XXI вв. по настоящее время. Формирование научных и туристско-рекреационных кластеров на базе ООПТ и прилегающих к ним территорий.

С 1992 по 2011 гг. на территории РФ были созданы 25 национальных парков, 28 заповедников и 10 федеральных заказников, а территории 1 национального парка, 25 заповедников и 1 заказника были расширены [15]. По состоянию на 2020 г. в РФ насчитывается около 11,8 тысяч ООПТ различного значения площадью 240,2 млн га [11]. В настоящее время одной из главных особенностей системы ООПТ в РФ является ее территориальное разнообразие, что в условиях неустойчивости экономического и политического

развития регионов препятствует выработке оптимальных подходов к формированию сети ООПТ и приданию ей стабильности. Существенное территориальное расширение не видится возможным, вследствие чего возникает целесообразность заповедания лишь некоторых наиболее актуальных в природном отношении объектов (преимущественно в степной и лесостепной зонах страны), а также упорядочение (расширение или изменение) территорий существующих заповедников [30]. Это утверждение подтверждается государственным докладом «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году», согласно которому в РФ наблюдается тенденция к увеличению общей площади

ООПТ при сокращении их общего количества (рис. 2).

На примере заповедников и заповедных зон национальных парков России установлено, что не более 20 % (по количеству функционирующих структур, а по площади – многократно меньше) отвечают критериям классических заповедников, сформулированным Г.А. Кожевниковым [19], И.П. Бородиным [1], В.П. Семёновым-Тян-Шанским [3], Н.Ф. Реймерсом и Ф.Р. Штильмарком [16, 27]. Происходит смещение приоритетов развития ООПТ. Если раньше ключевым считалось научно-исследовательское направление, то сейчас акценты развития заповедных территорий смещаются к туристско-рекреационной деятельности. Рассматривая инфраструктуру на ООПТ, необходимо отметить, что наряду с традиционными объектами (музеи природы, экологические тропы, смотровые башни и так далее) все большее распространение получают визит-центры. Как правило, визит-центры при ООПТ могут предоставлять информацию о заповедных территориях, туристических маршрутах, экскурсиях; оказывать сопутствующие рекреационные услуги; служить базой для размещения экспозиции и проведения различных мероприятий, связанных с экологическим просвещением. Обладая рядом достоинств, визит-центры вполне могут как работать в тесной взаимосвязи с музеями природы, так и взять на себя их функции.

Многие ООПТ развиваются или организуются в качестве кластеров, направленных на познавательный туризм (вне заповедных – строго запрещенных для деятельности и постороннего посещения, – зон). При этом одними из основных проблем в развитии существующих заповедных территорий так и остаются наличие физически и морально устаревших инфраструктур, недостаточная разработка экологических троп и маршрутов, отсутствие финансовой поддержки при развитии небольших по площади ООПТ в регионах. Многие объекты культурного наследия, находящиеся на ООПТ или на прилегающих к заповедным участкам территориях, находятся в аварийном состоянии и не включаются в сопутствующую инфраструктуру ООПТ. Не последней проблемой в развитии ООПТ, в частности заповедников, является их закрытость и ограниченность по части разрешённой в границах заповедных территорий деятельности. Таким образом, отсутствие должного количества средств современного технического прогресса в функционировании объектов инфраструктуры на территории заповедников и ООПТ, закрытость территорий и невозможность их развития приводит к потере значимости заповедных территорий в глазах общества, что неизбежно влечет к их деградации.

В качестве примера развития ООПТ с учетом вышеперечисленных проблем и в соответствии с поручением администрации области, авторами были рассмотрены три участка заповедника «Белогорье»: «Лес на Ворскле», «Стенки Изгорья» и «Ямская степь». При изучении ООПТ заповедника и прилегающих к ним территорий было выявлено следующее.

1. Участок «Лес на Ворскле» имеет прерывистую охранную зону. В границах участка располагается множество коренных типов деревьев (дуб, клен, вяз и так далее), троп копытных, барсучьих нор, мест обитания жуков-носорогов [17]. В ходе анализа антропогенных планировочных ограничений на ООПТ, были выявлены ветхие объекты инфраструктуры, подлежащие сносу, объекты научно-исследовательской базы Санкт-Петербургского государственного университета, исторический кордон, метеодуб, а также объект культурного значения регионального уровня – дом академика Сукачева. Для данного участка заповедника также характерно постоянное проживание сотрудников заповедника в границах территории участка, в том числе в объекте культурного наследия. К ООПТ прилегают земли поселений, транспортные связи, территории сельскохозяйственной направленности и пойменные территории р. Ворскла.

2. Участок «Стенки Изгорья» не имеет охранной зоны. В границах ООПТ обитают кабаны, также на прилегающих территориях имеются места обитания и стоянки речных птиц. Отличительной чертой флоры участка является наличие редких меловых сосен, большинство из которых сохранились. Антропогенные планировочные ограничения участка проявляются в присутствии железной дороги, проходящей по границе участка, что является преградой между территориями ООПТ и территориями лесного фонда.

3. Участок «Ямская степь» периметрально окружен охранной зоной. При этом все территории, сопредельные с заповедными, по характеру протекающих в их границах процессов являются землями сельхозугодий. Кроме того, в непосредственной близости от границ ООПТ располагается предприятие по добыче и обогащению железной руды, которое ведет разработку железорудного месторождения открытым способом – Лебединский горно-обогатительный комбинат (ЛГОК). Вследствие этого, заповедник находится под постоянным негативным воздействием со стороны ЛГОК-а, а сами ООПТ попадают в санитарно-защитную зону комбината. Также следует учитывать, что планы по развитию территорий комбината предполагают создание новых хвостовых

хранилищ, что крайне негативно скажется на экосистеме заповедника. Характеристики флоры участка заповедника заключаются в преобладающей степной растительности, наличии территорий лесного фонда, а также участков некосимой степи [17]. Фауна участка обладает различными видами животных – лисица обыкновенная, сурок-байбак, кабан и прочие.

В ходе исследования прилегающих к ООПТ территорий был выявлен потенциал к развитию в их границах туристско-рекреационной инфраструктуры. Так, земли сельских поселений, их транспортные связи, а также участки, необходимые для устойчивого социально-экономического развития территориальной единицы, признаны непригодными для формирования на их основе буферных территорий ООПТ. При этом водные и/или пойменные и сельскохозяйственные территории обладают самым высоким потенциалом к развитию, вследствие чего являются приоритетными для формирования на их базе буферной зоны ООПТ. Кроме того, путем частичного изъятия из земель с/х назначения деградированных территорий и ренатурации ландшафтов, на них возможно расширение границ ООПТ до природных рубежей. Речная сеть с прилегающими к ней территориями также имеет большой потенциал развития в качестве буферных зон. Так как имеются определённые ограничения в виде береговой полосы, прибрежной защитной полосы и водоохранной зоны, формирование какой-либо инфраструктуры может происходить с учётом установленного режима осуществления хозяйственной деятельности. В целом, принципы планировочной организации территорий отдыха и туризма должны учитывать региональную специфику и быть направлены «на укрепление и регенерацию природного каркаса с использованием лимитирующих факторов в качестве черт регионального своеобразия» [14].

Для дальнейшего развития заповедных территорий не только Белгородской области, но и РФ в целом, необходимо укреплять природный каркас регионов путем формирования непрерывной системы связующих элементов (экологических коридоров, участков ООПТ, буферных и охранных зон и так далее) в административных границах муниципальных районов. Важную роль при этом играет также устойчивость территорий ООПТ, то есть способность «ландшафта возвращаться к исходному соотношению компонентов при внешнем воздействии» [13]. Для этого следует проводить мероприятия по расширению границ заповедников до природных рубежей со статусом регионального значения путем частичного изъятия из земель с/х назначения деградированных территорий, проводить ренатурацию данных

ландшафтов. На прилегающих к ООПТ территориях необходимо формировать туристическую инфраструктуру и рекреационные пространства с целью привлечения инвестиций, социально-экономического развития территорий заповедников, а также интеграции ООПТ в туристско-рекреационную среду, чему также будет способствовать модернизация морально устаревшей функционально-планировочной структуры на ООПТ [12]. Необходимо формировать экологические тропы, научно-исследовательские и познавательные маршруты на ООПТ и прилегающих к ним территориях с включением в их структуру визит-центров, а также организовывать качественную среду для научно-исследовательской и образовательно-просветительской деятельности на территориях заповедников.

Выводы. Рассмотрено развитие заповедного дела в исторической ретроспективе с XVI в. по настоящее время. В результате изучения архивных источников, исследований исследователей-смежников (географов, историков, биологов, экологов, специалистов в области заповедного дела) выявлено, что развитие заповедных территорий в России происходило в пять этапов:

I этап. XVI-XVII вв. – предпосылки становления заповедного дела. Для данного этапа характерно формирование представления о ценности нетронутых природных комплексов. Это связывается с духовной и религиозной заповедностью территорий. Впоследствии формируются неприкосновенные государственные земли, предназначенные для корабельных лесов, хозяйств для княжеской и царской охоты, а также засечные полосы.

II этап. Конец XIX в. - начало XX в. – начальный этап становления заповедного дела. На данном этапе формируются первые заповедники – Баргузинский, Кедровая падь и так далее. Закладывается основа архитектурно-планировочной структуры при ООПТ – организовываются объекты для проведения различных исследований (научно-исследовательские станции), начинается становление музеев природы.

III этап. Середина XX в. – Великая Отечественная война и послевоенное время. В этот период происходила массовая ликвидация многих заповедников, вырубка лесов, уничтожение животного мира для военных нужд. Заповедное дело не развивалось, многие особо охраняемые природные территории были уничтожены или оказались под угрозой уничтожения.

IV этап. Конец XX в. – окончательное становление заповедного дела. Несмотря на то, что особо охраняемые природные территории пережили множество трудностей, связанных с тяго-

тами военного и послевоенного времени, результатом становления заповедного дела в России в конце XX века стала уникальная система заповедников. В это время активно развивается научно-исследовательская деятельность при ООПТ. Формируется инфраструктура на ООПТ (музеи природы, экологические тропы, смотровые башни и прочее).

У этап. С начала XXI в. по настоящее время происходит актуализация сохранения естественных природных комплексов среди населения, а также популяризация экологического туризма. Проводятся мероприятия по разрешению проблем развития ООПТ и заповедных территорий, связанных с их закрытым к посещению характером, отсутствием необходимой инфраструктуры, исключением ОКН из различных видов пользования. При заповедных территориях активно развиваются визит-центры. Поддержание и укрепление ООПТ, а также развитие прилегающих к ним территорий, позволит достигнуть экологического благополучия субъектов РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алехин В.В. Центральнo-Черноземные степи. Воронеж: Коммуна, 1934. 96 с.
2. Борейко В.Е. Святые дикой природы. Киев: Киевский экологокультурный центр, 1998. 112 с.
3. Бородин И.П. Охрана памятников природы. СПб., 1914. 31 с.
4. Горяшко А. История российских заповедников // Биология. 2000. № 40. С. 14–15.
5. Дитмар Б.П. Охрана природы в России (Исторический очерк) // Охрана природы. 1928. №5. С. 25–28.
6. Кожевников Г.А. Вопрос об охране природы на естественно-историческом совещании Центральнo-промышленной области // Живая природа, 1928. 12.
7. Корнеева Т.М., Нухимовская Ю.Д. Биосферные заповедники России и Севильская стратегия (смена приоритетов) // Экологические проблемы заповедных территорий России, Жигулевск, 04–08 сент. 2002 г. / Институт экологии Волжского бассейна РАН; Жигулевский государственный природный заповедник им. И.И. Спрыгина. Жигулевск: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 2003. С. 20–24.
8. Любавский А. Понижение имущественного ценза для образования заповедных имений // Юридическая монография и исследования. 1878. Т. 10. Ч. 1. 467 с.
9. Меркулов В.Н. «О работе государственных заповедников» // Архив МОИП. Д. 54. 63 л.
10. Насимович А.А. Дореволюционный период в развитии заповедного дела // Опыт работы и задачи заповедников СССР. М.: Наука, 1979. С. 7–20.
11. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 1000 с.
12. Перькова М.В. Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов (на примере Белгородской области) : специальность 05.23.22 «Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов» : диссертация на соискание ученой степени доктора архитектуры. Санкт-Петербург, 2019. 912 с.
13. Перькова М.В. Особенности культурно-исторических ландшафтов Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 74–79. DOI 10.12737/article_5a001ab4e9ebe7.66284113
14. Перькова М.В., Ладик Е.И. Формирование структуры туристско-рекреационных территорий Белгородской области с учетом региональных особенностей // Архитектура и строительство России. 2017. № 1 (221). С. 85–92. EDN YMVNOV.
15. Распоряжение Правительства России от 22.12.2011 N 2322-р «Об утверждении Концепции развития системы особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 года» (вместе с «Планом мероприятий по реализации Концепции развития системы особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 года») // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации Консорциума «Кодекс».
16. Реймерс Н.Ф., Штильмарк Ф.Р. Особо охраняемые природные территории. М.: Мысль, 1978. 274 с.
17. Рошупкина О.Е., Перькова М.В. Изучение природно-ресурсного потенциала территории заповедника «Белогорье» // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2019 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 504–510.
18. Рошупкина О.Е., Перькова М.В. Мировой опыт организации охраняемых природных территорий // Инновационная траектория развития современных наук о Земле: становление, задачи, прогнозы : Сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. (Белгород, 26–27 окт. 2020 г.), Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. С. 43–50.
19. Соловьев Д.К. Типы организаций, способствующих охране природы. М., 1918. 45 с.

20. Степаницкий В.Б. Заповедное дело в России: страницы и уроки истории [Электронный ресурс]. URL: [https://ecodelo.org/rossiyskaya_federaciya/43541-](https://ecodelo.org/rossiyskaya_federaciya/43541-zapovednoe_delo_v_rossii_stranicy_i_uroki_istorii)

zapovednoe_delo_v_rossii_stranicy_i_uroki_istorii (дата обращения 8.09.2021).

21. Тишков А.А. Географические основы заповедного дела России: Сто лет методологии территориальной охраны природы // Вопросы географии. 2017. № 143. С. 15–39.

22. Тишков А.А. Развитие заповедной сети России и академическая наука XX века. К 100-летию заповедной системы России // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 8. С. 734–744. DOI 10.1134/S1019331617040128.

23. Тишков А.А. Сто лет методологии территориальной охраны природы России (к 100-летию заповедного дела) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 1. С. 8–19. DOI 10.15356/0373-2444-2017-1-8-19.

24. Христофорова Н.К., Бисикалова В.Н. Заповедники России: история становления экологического просвещения // Вестник ДВО РАН. 2007. №3. С. 73–76.

25. Чибилёв А.А. История и современное состояние заповедного дела в России // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. №3. С. 231–241. DOI 10.7868/S0869587317030057.

26. Чибилёв А.А. Ландшафты степей Евразии как объект исторического степеведения // География и природные ресурсы. 2009. №3. С. 12–17. DOI 10.1016/j.gnr.2009.09.003.

27. Чибилёв А.А. Столетие заповедной системы России: исторические предпосылки, итоги и проблемы развития // Известия АО РГО. 2017. №2 (45).

28. Чибилёв А.А., Вельмовский П.В., Щербачева Е.А. Становление и развитие Российской идеи заповедного дела // Вопросы степеведения, 2019. 15 (15). DOI: 10.24411/9999-006A-2019-11555

29. Чибилёв А.А., Краснова Т.В. Актуальные страницы истории заповедного дела на территории России и сопредельных стран // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №3-7. С. 2080–2086.

30. Штильмарк Ф.Р. О проблемах природных заповедников и заповедного дела в России на современном этапе // Экологические проблемы заповедных территорий России, Жигулевск, 04–08 сент. 2002 г. / Институт экологии Волжского бассейна РАН; Жигулевский государственный природный заповедник им. И.И. Спрыгина. Жигулевск: Институт экологии Волжского бассейна РАН, 2003. С. 16–19.

Информация об авторах

Рощупкина Ольга Евгеньевна, аспирант. E-mail: olyarossof@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, доцент, советник РААСН, и.о. директора Высшей школы дизайна и архитектуры Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, профессор департамента архитектуры Российского университета Дружбы Народов, член Союза архитекторов, член Союза журналистов Москвы. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Российский университет Дружбы Народов. Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Поступила 8.04.2022 г.

© Рощупкина О.Е., Перькова М.В., 2022

^{1,*}*Roshchupkina O.E.*, ^{2,3}*Perkova M.V.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

³*Peoples' Friendship University of Russia*

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

DEVELOPMENT OF RESERVED TERRITORIES IN RUSSIA IN THE 16th – 21st CENTURIES

Abstract. *The development of the reserve management and studies is considered in a historical retrospective from the 16th century to the present. The study of archival sources and studies of allied researchers (geographers, historians, biologists, ecologists, specialists in the field of conservation), it was reveals that the development of protected areas in Russia took place in five stages. At the first stage (XVI-XVII centuries), the formation of a general idea of the value of untouched natural complexes is considered, which is associated with the spiritual and religious conservation of territories. At the second stage (the end of the 19th -beginning*

of the 20th centuries), the organization and formation of the first nature reserves are being studied. At the third stage (the middle of the 20th century - the Great Patriotic War and the post-war period) is studied the functioning of the reserves, which took place under the conditions of their mass liquidation in the war and post-war period. The fourth stage (the end of the 20th century) can be characterized as the final formation of the reserve management and studies as a unique system of reserves in Russia, the features of this stage are being studied. At the fifth stage (the beginning of the 21st century to the present), the development of reserves is considered from the side of updating the conservation of natural complexes, as well as the promotion of ecological tourism through the formation of scientific and tourist-recreational clusters on the basis of protected areas and adjacent territories.

Keywords: protected areas, reserved territories, specially protected natural areas, urban development, reserve management, ecological tourism.

REFERENCES

1. Alekhin V.V. Central Chernozem steppes [Tsentral'no-chernozemnyye stepi]. Voronezh: Commune, 1934. 96 p. (rus)
2. Boreiko V.E. Sanctuaries of the wild [Svyatilishcha dikoy prirody]. Kyiv: Kyiv Ecological and Cultural Center, 1998. 112 p. (rus)
3. Borodin I.P. Protection of natural monuments [Okhrana pamyatnikov prirody]. SPb., 1914. 31 p. (rus)
4. Goryashko A. History of Russian reserves [Istoriya rossiyskikh zapovednikov]. Biology. 2000. No. 40. Pp. 14–15. (rus)
5. Dietmar B.P. Nature Protection in Russia (Historical essay) [Okhrana prirody v Rossii (Istoriicheskiy ocherk)]. Nature Protection. 1928. No. 5. Pp. 25–28. (rus)
6. Kozhevnikov G.A. The issue of nature protection at the natural-historical meeting of the Central Industrial Region [Vopros ob okhrane prirody na yestestvenno-istoricheskom soveshchanii Tsentral'no-promyshlennoy oblasti]. Living Nature, 1928. 12. (rus)
7. Korneeva T.M., Nukhimovskaya Yu.D. Biosphere Reserves of Russia and the Seville Strategy (Change of Priorities) [Biosfernyye zapovedniki Rossii i Sevil'skaya strategiya (smena prioritetov)]. Ecological Problems of Reserve Territories of Russia, Zhigulevsk, 04–08 Sept. 2002. Institute of Ecology of Volga River Basin RAS; Zhigulevsk State Nature Reserve named after I.I. Sprygin. Zhigulevsk: Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, 2003, pp. 20–24. (rus)
8. Lyubavsky A. Lowering the property qualification for the formation of protected estates [Ponizheniye imushchestvennogo tsenzya dlya obrazovaniya zapovednykh imeniy]. Legal monograph and research. 1878. Vol. 10. Part 1. 467 p. (rus)
9. Merkulov V.N. On the work of state reserves [O rabote gosudarstvennykh zapovednikov]. Archive of MOIP. D. 54. 63 l. (rus)
10. Nasimovich A.A. Pre-revolutionary period in the development of the reserve business [Dorevolutsionnyy period v razvitiy zapovednogo dela]. Experience and tasks of the reserves of the USSR. M.: Nauka, 1979. Pp. 7–20. (rus)
11. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020 [O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu]. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2021. 1000 p.
12. Perkova M.V. Urban development of the regional system of settlement and its elements (on the example of the Belgorod region) [Gradostroitel'noye razvitiye regional'noy sistemy rasseleniya i yeye elementov (na primere Belgorodskoy oblasti): specialty 05.23.22 «Urban planning, planning of rural settlements»: dissertation for the degree of Doctor of Architecture. St. Petersburg, 2019. 912 p. (rus)
13. Perkova M.V. Features of cultural and historical landscapes of the Belgorod region of these territories of the Belgorod region, taking into account regional features [Osobennosti kul'turno-istoricheskikh landshaftov Belgorodskoy oblasti nnykh territoriy belgorodskoy oblasti s uchetom regional'nykh osobennostey]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 11. P. 74–79. (rus) DOI 10.12737/article_5a001ab4e9ebe7.66284113
14. Perkova M.V., Ladik E.I. Formation of the structure of tourist and recreational territories of the Belgorod region, taking into account regional features [Formirovaniye struktury turistsko-rekreacionnykh territoriy belgorodskoy oblasti s uchetom regional'nykh osobennostey]. Architecture and Construction of Russia. 2017. No. 1 (221). Pp. 85–92. (rus)
15. Decree of the Government of Russia dated December 22, 2011 N 2322-r «On approval of the Concept for the development of a system of specially protected natural areas of federal significance for the period up to 2020» (together with the «Action Plan for the implementation of the Concept for the development of a system of specially protected natural areas of federal significance for the period until 2020») [Ob utverzhdenii Kontseptsii razvitiya sistemy osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy federal'nogo znacheniya na period do 2020 goda» (vmeste

s «Planom meropriyatiy po realizatsii Kontseptsii razvitiya sistemy osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy federal'nogo znacheniya na period do 2020 goda»). Electronic fund of legal and regulatory information of the Consortium «Kodeks».

16. Reimers N.F., Shtilmark F.R. Specially protected natural areas [Osobo okhranyayemye prirodnyye territorii]. M.: Thought, 1978. 274 p. (rus)

17. Roshchupkina O.E., Perkova M.V. The study of the natural resource potential of the territory of the reserve «Belogorye» [Izucheniye prirodno-resursnogo potentsiala territorii zapovednika «Belogor'ye»]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the Belarusian State Technical University. V.G. Shukhova, Belgorod, May 01–20, 2019. Belgorod: Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova, 2019. Pp. 504–510. (rus)

18. Roshchupkina O.E., Perkova M.V. World experience in the organization of protected natural areas [Mirovoy opyt organizatsii okhranyayemykh prirodnykh territoriy]. Innovative trajectory of the development of modern Earth sciences: formation, tasks, forecasts: Sat. reports of the International scientific-practical. conf. (Belgorod, October 26–27, 2020), Belgorod: Publishing House of BSTU, 2020, Pp. 43–50. (rus)

19. Solovyov D.K. Types of Organizations Contributing to Conservation [Tipy organizatsiy, sposobstvuyushchikh okhrane prirody]. M., 1918. 45 p. (rus)

20. Stepanitsky V.B. Reserve business in Russia: pages and lessons of history [Zapovednoye delo v Rossii: stranitsy i uroki istorii] URL: [https://ecodelo.org/rossiyskaya_federaciya/43541-zapovednoye_delo_v_rossii_stranicy_i_uroki_istorii](https://ecodelo.org/rossiyskaya_federaciya/43541-zapovednoe_delo_v_rossii_stranicy_i_uroki_istorii) (date of the application 8.09.2021). (rus)

21. Tishkov A.A. Geographical Foundations of Russian Nature Reserves: One Hundred Years of Territorial Nature Conservation Methodology [Geograficheskiye osnovy zapovednogo dela Rossii: Sto let metodologii territorial'noy okhrany prirody]. Voprosy geografii. 2017. No. 143. Pp. 15–39. (rus)

22. Tishkov A.A. Development of Russia's network of nature reserves and academic science of the 20th century [Razvitiye zapovednoy seti Rossii i akademicheskaya nauka 20 veka. K 100-letiyu zapovednoy sistemy Rossii]. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 87. No 4. Pp. 385–395. (rus) DOI 10.1134/S1019331617040128.

23. Tishkov A.A. One Hundred Years of the Methodology of Territorial Nature Protection of Russia: on the Centenary of Nature Conservation.

Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya.. [Sto let metodologii territorial'noy okhrany prirody Rossii (k 100-letiyu zapovednogo dela)]. 2017. 1. Pp. 8-19 (rus) DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-8-19.

24. Khristoforova N.K., Bisikalova V.N. Reserves of Russia: the history of the formation of environmental education [Zapovedniki Rossii: istoriya stanovleniya ekologicheskogo prosveshcheniya]. Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences. 2007. No. 3. Pp. 73–76. (rus)

25. Chibilev A.A. History and current status of reserve management and study in Russia [Istoriya i sovremennoye sostoyaniye zapovednogo dela v Rossii]. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 87. No 2. Pp. 181–190. (rus) DOI: 10.1134/S1019331617020022.

26. Chibilev A.A. Landscapes of Eurasian steppes as the object of historical steppe science [Landshafty stepey Yevrazii kak ob'yekt istoricheskogo stepovedeniya]. Geography and Natural Resources. 2009. Vol. 30. No 3. Pp. 219–223. (rus) DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.003.

27. Chibilev A.A. Centenary of the Reserve System of Russia: Historical Background, Outcomes and Problems of Development [Stoletiye zapovednoy sistemy Rossii: istoricheskiye predposylki, itogi i problemy razvitiya]. Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society. 2017. No. 2 (45). (rus)

28. Chibilev A.A., Vel'movsky P.V., Shcherbakova E.A. Formation and development of the Russian idea of conservation [Stanovleniye i razvitiye Rossiyskoy idei zapovednogo dela]. Steppe science, 2019. 15 (15). (rus) DOI: 10.24411/9999-006A-2019-11555.

29. Chibilev A.A., Krasnova T.V. Actual pages of the history of nature reserves in Russia and neighboring countries [Aktual'nyye stranitsy istorii zapovednogo dela na territorii Rossii i sopredel'nykh stran]. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. No. 3–7. Pp. 2080–2086. (rus)

30. Shtilmark F.R. On the problems of natural reserves and nature reserves in Russia at the present stage [O problemakh prirodnykh zapovednikov i zapovednogo dela v rossii na sovremennom etape]. Environmental problems of protected areas in Russia, Zhigulevsk, 04–08 september 2002. Institute of Ecology of Volga River Basin RAS; Zhigulevsky Zapovednik «I.I. Sprygin». Zhigulevsk: Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, 2003. Pp. 16–19. (rus)

Information about the authors

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

Perkova, Margarita V. DSc, Professor. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia. Peoples' Friendship University of Russia. Miklukho-Maclay st., 6. Russia, Moscow, 117198.

Received 08.04.2022

Для цитирования:

Рощупкина О.Е., Перькова М.В. Развитие заповедных территорий в России в XVI – XXI вв. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 66–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-66-77

For citation:

Roshchupkina O.E., Perkova M.V. Development of reserved territories in Russia in the 16th – 21st centuries. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 66–77. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-66-77

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-78-90

Бочкарева Н.А., Калошина Л.Л.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: natashabochkarewa@yandex.ru*

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ОПЫТА РЕСТАВРАЦИИ, РЕКОНСТРУКЦИИ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ ЭЛЕВАТОРОВ

Аннотация. В статье выявляются основные объемно-планировочные характеристики зерновых элеваторов, их градообразующая роль, и анализируется современный опыт реставрации, реконструкции и приспособления таких сооружений в России и за рубежом. Рассматриваются цели и причины адаптации элеваторов в новое городское пространство. В ходе исследования были рассмотрены примеры реконструкции и адаптации данных объектов под различные функции, выявлены основные приемы и модификации, проводимые со зданиями элеваторов. Также изучены материалы исследований российских и зарубежных авторов по данной теме. В России мало примеров реставрации и приспособления таких объектов. Проблема сноса элеваторов остается актуальной в нашей стране, что говорит о необходимости в анализе зарубежного опыта и составлении модели интеграции данных объектов в современное городское пространство.

Статья содержит результаты исследования по функциональному перепрофилированию зерновых элеваторов: основные тенденции и направления. Выводы, полученные в результате анализа реализованных объектов и проектных предложений, могут стать основой для дальнейшей работы с такими сооружениями. Статья может быть интересна специалистам, изучающим вопросы сохранения промышленных сооружений и их адаптации к новой среде с новыми социальными потребностями.

Ключевые слова: реконструкция, приспособление, характеристики зерновых элеваторов, приемы реконструкции, реставрация зерновых элеваторов, причины сохранения промышленных объектов.

Введение. Промышленная архитектура была выделена как отдельное явление во второй половине XIX века, когда для крупномасштабного производства массовой продукции стал использоваться железобетон. Историческая промышленная архитектура является неотъемлемой частью городской среды. Многие промышленные объекты и комплексы играют немаловажную роль в застройке магистралей, набережных, в формировании силуэта и панорам города. Промышленная архитектура создает образ исторических промышленных городов. Кроме того, немало объектов обладает высокой историко-культурной ценностью и относится к памятникам архитектуры. В настоящее время с развитием технологий исторические промышленные предприятия зачастую становятся ненужными, воспринимающимися как «черные дыры» в городской ткани. Сегодня большинство из них пребывают в крайне запущенном состоянии и продолжают разрушаться, так как их эксплуатация прекращена. Проблема выбора метода работы с такими объектами актуальна: сносить или возрождать к жизни, размещая новую функцию?

Значение строительства элеваторной системы в Российской империи в отечественной историографии рассматривает в своем исследовании Т. Толкачева, она пишет: «Стимулом для строительства элеваторной системы стали «голодные» годы, вызвавшие осознание у общественных деятелей идеи создания товарных и производственных запасов» [1].

Наибольшая часть научных публикаций посвящена классификации промышленных объектов в целом, методам реновации объектов, а также факторам, определяющим выбор их нового функционального наполнения [2]. Причины, задачи и приемы реконструкции промышленной архитектуры подробно освещаются в работе О. Сысоевой (2015).

Описание назначения и объемно-планировочных характеристик зерновых элеваторов дается в материалах Платонова П.Н. (1971) и Волошина Е.В. (2019). Современные направления интеграции исторических производственных объектов в городскую среду рассматривает Д. Чайко (2016). Вопросом интеграции зерновых элеваторов Испании занимался исследователь Carlos Mateo Caballos (2010). Он систематизировал информацию обо всех элеваторах Испании как о неотъемлемой части истории. Carlos Mateo Caballos считает целесообразным интегрировать элеваторы как устойчивую ценность в стратегии экономического, социального, городского и культурного развития [3]. Исследователи из Италии Francesca Giuliani и Anna De Falco также оценивают историческую ценность элеваторов и уникальность данной типологии, отмечая сложности приспособления таких сооружений. Они разработали методiku, предоставляющую возможность оценить по разным критериям элеваторы для адаптивного использования в любой части мира [4].

Систематизированного материала по зерновым элеваторам нашей страны крайне мало.

Методология. Цель данной статьи – рассмотреть и проанализировать примеры реставрации, реконструкции и приспособления под различные функции зерновых элеваторов, выявить основные приемы работы с данными объектами.

Исследование проводилось на основе поиска, систематизации информации о реализованных и нереализованных проектах, содержащихся в открытом доступе и сети Интернет, а также анализа зарубежного и отечественного опыта реконструкции зерновых элеваторов.

Основная часть. Реконструкция подразумевает различные виды мероприятий, направленные на реорганизацию архитектурно-пространственной структуры индустриального объекта с целью его дальнейшего использования. Сысоева О.И. выявляет следующие приемы реконструкции, применяемые на практике [5]:

- пристройка к существующему зданию или встройка в его объем;
- надстройка здания или его частей;
- перепланировка;
- устройство дополнительных уровней;
- устройство новых конструкций.

Выбор приема зависит от типа здания. Каждый реконструируемый промышленный объект или их комплекс требует поиска специальных решений.

Приспособление – изменение первоначального функционального наполнения объекта на новое, актуальное для современного использования. Подразумевает реставрационные работы и зачастую перепланировку здания. Чаще всего в бывших промышленных зданиях размещают музеи, выставочные и торгово-развлекательные комплексы, образовательные организации и мастерские, спортивные и оздоровительные учреждения, офисы и жилье [5].

В.П. Точина выделяет методы реновации промышленных объектов, такие как:

1. Метод «аппликации» подразумевает формирование композиции на базе ранее имеющихся систем, за счет «наложения» новых строительных технологий и использованных материалов.

2. Метод «сопоставлений» подразумевает сравнение проектируемого объекта с теми или иными качествами образного аналога. Он используется в том случае, если объекту следует добавить новые свойства.

3. Метод «внедрений» – врезка добавочных компонентов и строений в имеющиеся сооружения пространственно-планировочной композиции [6].

В зарубежном опыте проектирования принято считать данные процессы одним

понятием – адаптивное повторное использование [7]. Все это в той или иной степени связано с изменением первоначального функционального назначения старых зданий, сооружений и прилегающих территорий, имеющих историческую ценность, с современным использованием их под иные цели [8]. Тем не менее, некоторые проекты адаптивного повторного использования включают реставрацию фасада здания или частей интерьера [7].

Бессарабова Я.И. в своем исследовании отмечает необходимость в анализе всех факторов, влияющих на функцию здания, также важно учитывать возможность сохранения и модернизации производственной функции: «При определении целевого назначения бывших промышленных предприятий необходимо проводить градостроительный, экономический и социокультурный анализ, а также обращать особое внимание на аспекты, позволяющие сохранить промышленную функцию» [9].

1. Объемно-пространственные характеристики зерновых элеваторов.

Элеваторы – это промышленные сооружения, предназначенные для хранения, обработки и перегрузки зерновых культур. Наиболее часто они входят в состав крупных промышленных комплексов, но также могут строиться обособленно, как, например, портовые элеваторы.

Е.В. Волошин классифицирует зерновые элеваторы по функции: заготовительные элеваторы, производственные и портовые элеваторы. Заготовительные, в свою очередь, подразделяются на: *перевалочные элеваторы*, предназначенные для перегрузки зерна, *базисные элеваторы* – для хранения крупных партий зерна с большой вместимостью, их смешанный тип – *базисно-перевалочные элеваторы* [10].

Зерновые элеваторы представляют собой комплексы сооружений со следующим составом: соединенные друг с другом силосные башни-корпуса, обслуживающее здание, устройства для погрузки и выгрузки зерна, зерносушилки. Силосные башни соединяются с обслуживающим (рабочим) зданием, где размещается основное оборудование [11].

Элеваторы в отличие от большинства других большепролетных промышленных сооружений с малой этажностью являются высокими сооружениями. Композиция силосного корпуса, основного элемента элеватора, состоит из следующих элементов:

- силосной части;
- одно- или двухэтажной надсилосной галереи (при наличии механического горизонтального транспорта);

• подсилосного этажа (надземного или подземного) [11].

Силосные железобетонные емкости могут иметь разнообразную в плане форму, но чаще состоят из двух типов конструкций: квадратных

сборных или круглых монолитных конструкций диаметром шесть и девять метров, высотой от тридцати метров (рис. 1).

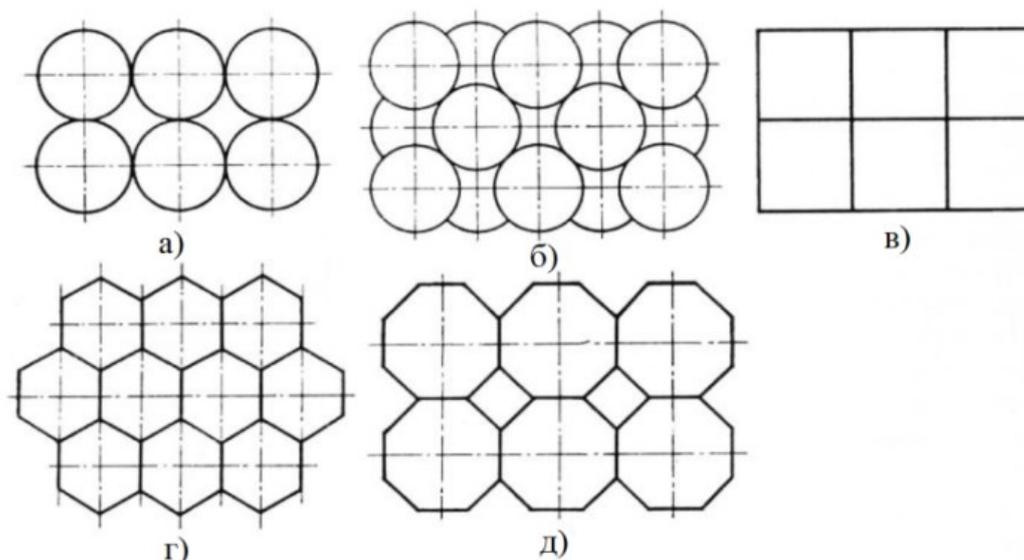


Рис. 1. Формы и расположение силосов: а, б – круглое при рядовом и шахматном расположении; в – квадратное; г – шестигранное; д – восьмигранное

По своей архитектуре здания элеваторов выглядят величественно и напоминают конструктивистские храмы. Из-за массивности данные сооружения сложно вписываются в городскую ткань, особенно когда речь заходит об исторической среде. Но, тем не менее, нельзя категорично относиться к подобным сооружениям и подвергать сносу без предварительного анализа. Существует целый ряд причин для реконструкции промышленных зданий и сооружений. О.И. Сысоева выделяет социально-экономические, технико-экономические, градостроительные, экологические, архитектурно-строительные, эстетические и социальные причины [5].

Причинами для реставрации и реконструкции являются объемно-пространственные характеристики здания, благоприятные для размещения практически любой функции, удовлетворительное состояние конструкций, также нередко причина и цель – сохранение истории места.

Сформировавшийся пласт заброшенных элеваторов является резервом при реновации бывших производственных объектов. Благодаря уникальным объемно-пространственным характеристикам элеваторы имеют большой потенциал для реконструкции и выбора нового функционального наполнения.

В современной практике интеграции промышленных объектов в городскую среду и их функционального перепрофилирования кроме архитектурно-пространственного потенциала

объекта необходимо учитывать социально-культурные потребности населения. Д. Чайко выделяет развитие социокультурной среды как одну из главных причин реконструкции объектов промышленности: «Меняются идеологические системы и мировосприятие людей, меняется общественная психология, а вместе с этими процессами происходит постоянный пересмотр систем ценностей и смысловых значений. Одной из основных причин преобразований старых предприятий, является – динамичное развитие самого социума и социокультурной среды города» [12].

Социальные преимущества реконструкции и рефункционализации зданий промышленного наследия заключаются в оживлении зданий и благоустройстве прилегающих территорий. По соседству здания, относящиеся к более ранним периодам, способны служить связующим звеном с прошлым, и создавать «ощущение места» [13].

2. Международный опыт.

В зарубежном опыте существует множество примеров реставрации и реконструкции с приспособлением зерновых элеваторов под различные функции.

1) Одним из первых примеров преобразования зерновых элеваторов является проект реконструкции 1980 года в г. Акрон, США (рис. 2). Зерновой элеватор был приспособлен под отель при университете [14].

Силосный корпус перепланирован в уютные номера с лоджиями круглой конфигурации. Эле-

ватор сохранен как памятник истории американской агропромышленности. В 1975 г. здание было внесено в Национальный реестр памятников. На первом этаже расположен музей с экспозицией, посвященной машинам и механизмам

индустриальной эпохи. Приемы реконструкции: устройство перекрытий, дверных и оконных проемов.



Рис. 2. Реконструкция зернового элеватора с приспособлением под отель, г. Акрон, США
[Источник: <https://www.quakersquareakron.com/images/quakersquare.jpg>]

2) Ярким примером реконструкции и приспособления зернового элеватора является проект датского архитектурного бюро COBE, реализованный в 2017 году [15]. Бывшее зернохранилище, крупнейшее промышленное здание района Нордхавн в Копенгагене, преобразовано в жилой комплекс с общественной функцией (рис. 3, 4). Элеватор сыграл важную роль в формировании данной территории, будучи доминантой и ядром промышленности района. Его ценность была признана, поэтому было решено сохранить объект, модифицировав его облик.

При реконструкции здания были использованы метод надстройки и перепланировки. Бетонный фасад рабочего здания элеватора был облицован в соответствии с современными стандартами, внутренняя часть была полностью сохранена. Внешний фасад с угловыми гранями, выполненный из оцинкованной стали, был установлен в качестве защитного экрана. Материал позволил сохранить характерную форму здания и создать напоминание о промышленном прошлом.

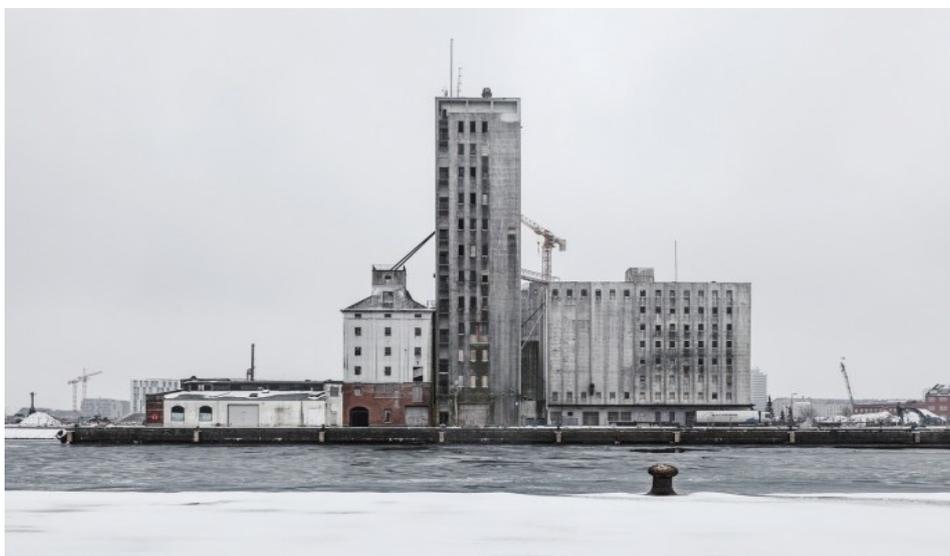


Рис. 3. Зерновой элеватор до реконструкции, г. Копенгаген, Дания.
Фотографии: Расмус Хьортшой, Мария Гонсалес. [Источник: <https://www.cobe.dk/place/the-silo/>]



Рис. 4. Зерновой элеватор после реконструкции, г. Копенгаген, Дания

Фотографии: Расмус Хьортшой, мария Гонсалес.

[Источник: https://www.cobe.dk/imagecache/uploads/places/the-silo/3354/130b_cobe_silo_exterior_d0c0e91a50d9127766efd865c2a70d9a.jpg]

Основная цель проекта заключается в преобразовании элеватора с сохранением его структуры и самобытности. Пространство силосов позволило создать уникальное планировочное решение квартир. Обслуживающее здание элеватора надстроено этажом, в котором располагается ресторан с 360-градусной обзорной площадкой. Зеркальный фасад отражает окружение днем, а ночью напоминает фонарь. Первый этаж спроектирован как гибкое пространство для проведения мероприятий.

Таким образом, ключевые аспекты проекта отражены в сохранении истории, «духа места», сохранении градостроительной роли элеватора в качестве доминанты и адаптации его к современным условиям, создании новой точки притяжения.

3) Примером концептуального переосмысления промышленного объекта является проект реконструкции и приспособления под музей зернового элеватора в г. Кейптауне, ЮАР, представленный мастерской Heatherwick Studio и реализованный в 2017 году [16].

В прошлом элеватор был самым высоким зданием в Южной Африке, но с развитием индустрии его эксплуатация была приостановлена. Заброшенный с 1990 года, зерновой элеватор является памятником промышленному прошлому Кейптауна, получившим новую жизнь благодаря преобразованиям архитекторов (рис. 5, 6).

Большую часть площади занимают выставочные залы (всего 80 помещений общим размером 6000 м²), образовательные зоны, институт

костюма, запасник, реставрационные мастерские, центры перформанса, кино, кураторского дела.

Также предусмотрены сад скульптур на крыше, книжные магазины, кафе, рестораны. В силосах были буквально «вырезаны» атриумы, используемые как выставочное пространство с верхним освещением. Рабочая башня элеватора приспособлена под отель. Ее верхняя часть заменена стеклянными панелями, напоминающие фонари. Благодаря перепланировке с сохранением конструкций и их фактур удалось создать впечатляющие футуристические интерьеры.

Оригинальное проектное решение архитектуры с сохранением основного объема элеватора позволило создать достопримечательность города. Новый культурный центр способствует привлечению туристов. Это первый в Африке крупный музей современного искусства.

Таким образом, опорными точками для реконструкции и реставрации элеватора стало его уникальное расположение — производственное здание является визуальным ориентиром, играет важную роль в формировании силуэта города. Также объект имеет высокую историческую ценность.

4) Совершенно новая жизнь была дана бывшему зерновому элеватору в Финляндии [17]. Архитектурное бюро PAVE Architects представило в 2014 году проект реконструкции с элементами реставрации. Ранее элеватор служил архитектурной доминантой в данном районе города Оулу (рис. 7, 8).



Рис. 5. Зерновой элеватор до реконструкции, г. Кейптаун, ЮАР
[Источник: <http://www.heatherwick.com/projects/buildings/zeitz-mocaa/>]

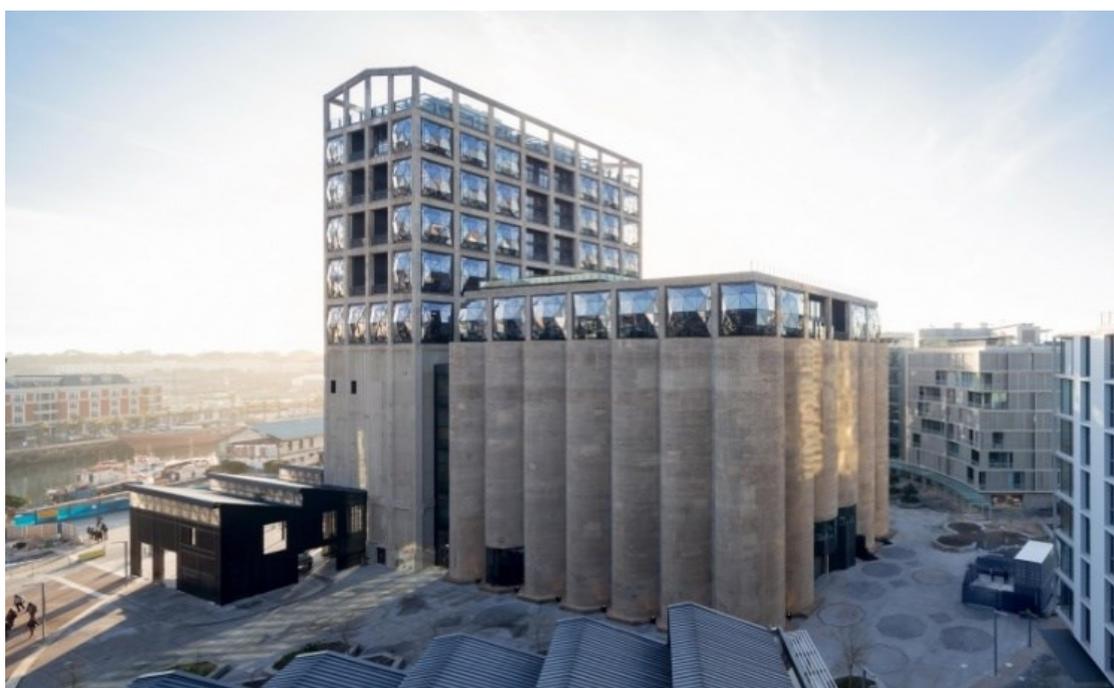


Рис. 6. Зерновой элеватор после реконструкции мастерской Heatherwick Studio, г. Кейптаун, ЮАР
Фотографии: Айван Баан. [Источник: <https://archi.ru/world/75689/atrium-zerno#slider-1>]

Бывшее промышленное сооружение получило новое функциональное наполнение в виде многоквартирного жилого дома. В результате технического обследования состояние несущих конструкций силосов было признано аварийным. Но внешний образ и исторический фасад элеватора было решено сохранить. Поэтому часть силосов была восстановлена в оригинальной форме с помощью новых материалов. Реконструкция

подразумевает также пристройку дополнительного прямоугольного в плане объема на месте демонтируемых конструкций силосов, устройство перекрытий, оконных проемов, лоджий.

Перепланировка позволила поместить разнообразное сочетание апартаментов в стиле лофт. Круглые силосные сооружения используются в качестве продолжения помещений и лоджий. На верхнем этаже расположились зоны общего пользования и терраса.



Рис. 7. Элеватор до реконструкции, г. Оулу, Финляндия.

[Источник: <https://www.vastavalo.net/kesa-salmi-ranta-laituri-toppilan-viljasiilot-305734.html>]



Рис. 8. Элеватор после реконструкции мастерской PAVE Architects.

Фотографии: Арно де ла Шапель. [Источник: <https://www.pavearkkitechdit.fi/work/co-op-oulu-tervahovin-siilot/>]

В результате реконструкции был создан новый объект, сохранивший историю своего предшественника – зернового элеватора. Просторные квартиры, стильные лофт интерьеры, напоминающие о промышленной истории здания, привлекательны для аренды и покупки жилья. Соответственно, бывший производственный район и его заброшенные объекты будут постепенно реанимироваться.

5) Проект реставрации и реконструкции мукомольного завода в Китае мастерской FAX ARCHITECTS, реализованный в 2017 году, отличается минимальным вмешательством в архитектуру промышленного объекта [18].

Завод располагается вдоль реки, за пределами городского центра. На его территории размещены склады, цеха, зернохранилище, обслуживающие здания, отличающиеся высокими этажами и закрытыми, массивными фасадами. Перепланировка зданий соответствует пространственным характеристикам подлинного мукомольного завода.

Основные конструкции были сохранены, добавлено больше остекления для взаимодействия внутреннего и внешнего пространств. Элементы, находящиеся в аварийном состоянии, были реставрированы или заменены современными вставками. На крышах организованы зеленые

сады. Из закрытого пространства мукомольного завода создано открытое, гостеприимное пространство с различными функциями: развлекательной, культурной, деловой. Эlevator приспособлен под выставочную галерею. Его архитектура осталась практически неизменной. Первый

этаж адаптирован под современные требования эксплуатации, остеклен и оснащен эвакуационными выходами, силовые конструкции частично демонтированы, образуют пространство галереи (рис. 9). Таким образом, промышленному комплексу дана новая жизнь.



Рис. 9. Интерьер в силосном корпусе по проекту бюро Fax Architects. Китай.

[Источник: <https://www.archdaily.com/883831/wenzhou-mifang-industry-park-fax-architects/5a10103db22e386e1800039c-wenzhou-mifang-industry-park-fax-architects-photo>]

6) В 2016 году архитекторы бюро RSAA предложили проект реконструкции зернового элеватора в г. Кристиансанне (Норвегия) [19]. Главная идея заключается в создании «арткуба», пространства, переходящего от набережной к жилой зоне. В силосном корпусе создается арка: часть силосов буквально «вырезана», раскрывается вид на конструкции. Это позволяет увидеть внутреннюю форму элеватора. Благодаря такому приему, элеватор сам частично выступает как арт-объект.

К реконструируемому элеватору пристроено несколько объемов. Также он дополнен стеклянной пристройкой сверху, в ней подразумевается озеленение. Бывшее промышленное сооружение получило новое наполнение в виде многофункционального центра. Зернохранилище также содержит в себе кафе, ресторан и смотровую площадку.

Новые постройки вместе с реконструируемым элеватором создают площадь, охватывающую всю длину его силосной части (рис. 10).

Хотя проект и не был осуществлен, концепция интеграции элеватора в современную среду с сохранением памяти места и подчеркиванием уникальности его конструктивной системы, безусловно, интересна.

7) Квартал Ротерманни в Таллинне — бывшая промышленная зона для производства продуктов питания, расположенная между старым городом и портом — берет свое начало с 1828 года [20]. Одно из самых впечатляющих зданий в квартале — зерновой элеватор, основанный в 1904 г., отреставрирован и расширен в 1930 г. архитектором Эрнстом Боудстедом (рис. 11). В 2016 г. архитектурное бюро КОКО завершило работы по преобразованию элеватора в многофункциональный объект, в составе которого офисы, танцевальные студии и ресторан [21]. В интерьере сохранены оригинальные конструкции как напоминание об историческом назначении объекта.

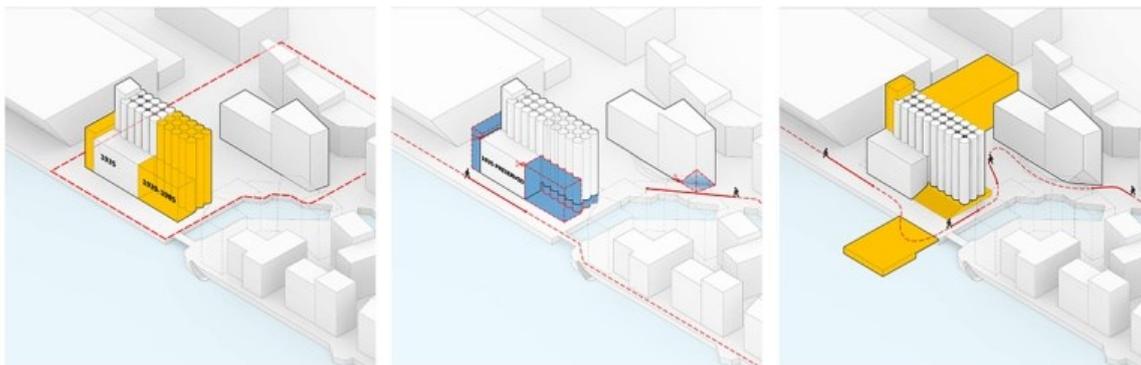


Рис. 10. Схема концепции реконструкции мукомольного завода в Норвегии, бюро RSAA
[Источник: <http://rs-aa.cn/projects/cultural>]



Рис. 11. Зерновой элеватор в промышленном квартале Ротерманны, Эстония
[Источник: <https://www.archdaily.com/798658/rotermann-grain-elevator-koko-architects/581a9bcee58ece7a4b000283-rotermann-grain-elevator-koko-architects-image>]

3. Российский опыт.

В российском опыте подобных примеров гораздо меньше, такие проекты остаются на бумаге, предпочтение отдается сносу и строительству на месте элеваторов новых зданий. Примером может быть снос элеватора в Нижнем Новгороде и снос мельничного комбината №4 в Москве. Среди российских проектов мало реализованных решений. На данный момент закончена реставрация элеватора в Новороссийске, который имеет статус памятника и является одним из крупнейших в мире. Был проведен полный цикл работ по сохранению объекта культурного наследия, но здание осталось закрытым для жителей города. Если элеватор будет функционально перепрофилирован и доступен для посетителей и

туристов, то может стать «первым примером полноценной реновации такого типа сооружений у нас в стране» [22].

Но в России есть интересные концепции. Например, конкурсный проект бюро Megabudka, занявший 2-е место на Архитектурной Биеннале в 2019 году в Казани [23].

Мастерская предложила приспособление элеватора под жилье и офисы (рис. 12). Для обеспечения инсоляции предполагается демонтаж части силосов и их остекление.

Территория завода преобразована в открытое пространство и соединена с исторической частью города велосипедной и пешеходными дорожками. Элеватор сохранен как историческая доминанта, из заброшенной промышленной зоны

территория завода превратилась в открытую набережную.

При реализации модели интеграции элеваторов в городскую среду с использованием современных средств акцентирования, мы, в результате, сможем получить новые образы этих объектов. Как пишет А. Чадович (2013), зарубежный опыт полезен тем, что «осмысление, наряду с

накопленным местным опытом, может помочь в создании мощного теоретического фундамента, рекомендательного и регулятивного остова, прогностического, модельно-имитационного и субсидийного оснащения и творчески отработанного завершения в отечественной практике адаптивного повторного использования» [24].



Рис. 12. Проект реконструкции элеватора в Казани, бюро Megabudka.
[Источник: <https://megabudka.ru/posts/1916>]

Выводы. Анализ международного опыта реставрации, реконструкции и приспособления зерновых элеваторов позволил выявить, какие приемы и модификации применяются при работе с данными промышленными объектами. В основном, это:

- перепланировка и демонтаж конструкций,
- вырезание оконных, дверных проемов,
- устройство перекрытий,
- создание многоуровневых пространств и атриумов,
- надстройка дополнительными конструкциями,
- пристройка новых объемов,
- озеленение кровли.

Благодаря разнообразию вариантов дополнения облика элеваторов, возможно придать необычный образ таким зданиям. Уникальность конструктивной системы может быть отражена в интерьерах.

В ходе анализа выявлены основные функции для приспособления зерновых элеваторов: жилая с сочетанием общественно-деловой, выставочная и комбинации этих функций. Выставочная функция чаще размещается в объектах, приближенных к центру города. С отдалением объекта превалирует деловая, образовательная и жилая функции.

Проекты повторного использования и рефункционализации бывших промышленных зданий оживляют не только их внутреннюю структуру, но и прилегающую территорию. Многие из этих проектов восстанавливают специфику места, элементы первоначальной структуры, а также возрождают интерес к богатому историческому прошлому района. Проблема интеграции объектов промышленной архитектуры в современную городскую среду является актуальной не только с позиций стремления сохранить культурное наследие и уникальность таких объектов, но и с позиции экологии. При сносе неэксплуатируемых объектов промышленности образуется огромное количество строительных отходов, утилизация которых требует немалых затрат.

Таким образом, реставрация, реконструкция и приспособление промышленных зданий гораздо эффективнее их сноса. Это позволяет разнообразить застройку различными по типологии зданиями и повысить культурные ценности жителей города.

Заключение. Реконструкция уникальных по архитектуре сооружений, таких как элеваторы, дополняет облик города и его силуэт. С сохранением таких объектов и их интеграцией в современное пространство история города и его пространство обогащается. Поэтому реставрация и реконструкция с приспособлением объектов промышленной архитектуры, в том числе зерновых

элеваторов, является наиболее рациональным методом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толкачева Т.В. Строительство элеваторной системы в России (на примере Самарской губернии) в конце XIX-начале XX веков // Известия ПГПУ имени В.Г. Белинского. 2012. №27. С. 1044–1046.
2. Ферисов О.И., Шенбергер Т. Analysis of the experience in adaptive reuse of industrial architecture with new social functions // Modern industrial and civil construction. 2013. Т. 9. № 3. С. 141–151.
3. Salamanca Cascos D., Mateo Caballos C. Red Nacional de Silos. Integración en la realidad urbana andaluza y su reutilización para nuevas tipologías // Lámpara: patrimonio industrial. 2010. No.3. Pp. 8–17
4. Bevilacqua M.G., De Falco A. Reusing grain silos from the 1930s in Italy. A multi-criteria decision analysis for the case of Arezzo // Journal of Cultural Heritage. 2018. Vol. 29. Pp. 145–159 DOI:10.1016/j.culher.2017.07.009
5. Сысоева О.И. Реконструкция промышленных объектов: учеб. пособие. Минск: БНТУ, 2015. 136 с.
6. Точина В.П., Попов А.Д., Танкова Н.А. Принципы и методы реновации промышленных объектов в мировой практике // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №6. С. 78–82. DOI:10.34031/arti-cle_5d079e0ec02547.40724825
7. Карасев Р.О. Реорганизация промышленных территорий и архитектурных объектов с учетом адаптивных процессов // Известия КГАСУ. 2020. №2(52). С. 177–186.
8. Цепилова О.П. Анализ опыта повторной адаптации промышленной архитектуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №12. С. 74–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90
9. Бессарабова Я.И., Евтушенко-Мулукаева Н.М. Реновация и интеграция промышленных мероприятий в современную городскую среду // Научно-исследовательский журнал. 2019. №3(81). С. 169–171. DOI: 10.23670/IRJ.2019.81.3.035
10. Волошин Е.В. Элеваторы и склады: учебное пособие. Часть 2. Оренбург: ОГУ, 2019. 97 с.
11. Платонов П.Н., Лебединский В.Г., Фаман В.С. Элеваторы и склады. Москва: Колос, 1971. 311 с.
12. Чайко Д.С. Современные тенденции нового использования исторических промышленных объектов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №3(45). С. 47–51. DOI: 10.18454/IRJ.2227-6017
13. Faraneh Sahraiyán, EgeUlucá Túmer. Adaptive Reuse of Industrial Buildings: Case Study of Tenten Factory in Famagusta // Journal of Engineering and Architecture. 2017. Vol.5. No.1. Pp. 50–60 DOI: 10.15640/jea.v5n1a6
14. Quakersquareinn: Akron Hotel and Silo. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.quakersquareakron.com/> (дата обращения: 28.02.2022).
15. Cobe: The Silo. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cobe.dk/place/the-silo/> (дата обращения: 28.02.2022).
16. Archi.ru: Музей современного африканского искусства Цайца. [Электронный ресурс]. URL: <https://archi.ru/projects/world/8542/muzei-sovremennogo-afrikanskogo-iskusstva-caica> (дата обращения: 28.02.2022).
17. Archdaily: The Tervahovi Silos. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.archdaily.com/887591/the-tervahovi-silos-pave-architects> (дата обращения: 28.02.2022).
18. Fax Architects: MIFANGCEL PLAZA PROJECT. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fax.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=110> (дата обращения: 28.02.2022).
19. Archdaily: RSAA's Kunstsilo Proposal Accentuates, Preserves, and Modifies Historical Silo in Norway [Электронный ресурс]. URL: https://www.archdaily.com/796698/rsaas-artcube-proposal-accentuates-preservers-and-modifies-historical-silo-in-norway?ad_medium=gallery (дата обращения: 28.02.2022).
20. Koko: Rotermann grain elevator. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.koko.ee/en/projects/type/all-types/project/78-rotermanni-elevator> (дата обращения: 28.02.2022).
21. Дианова-Клокова И.В., Метаньев Д.А., Хрусталева Д.А. К вопросу об инновационном преобразовании пространства памятников индустриальной архитектуры // Системные технологии. 2021. №38. С. 167–179.
22. Трибельская Е.Г., Московцева А.М. Особенности реновации агропромышленных комплексов (на примере элеваторов) // Системные технологии. 2019. № 32. С. 84–95.
23. Megabudka: Ревитализация территории элеватора. [Электронный ресурс]. URL: <https://megabudka.ru/posts/1916> (дата обращения: 28.02.2022).
24. Чадович А.А. Сохранение или снос? Компромисс! // Architecture and modern information technologies. 2013. №1(22). С. 1–13.

Информация об авторах

Бочкарева Наталья Александровна, магистрант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: natashabochkarewa@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Калошина Людмила Львовна, доцент кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: milakarus@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 14.03.2022 г.

© Бочкарева Н.А., Калошина Л.Л., 2022

***Bochkareva N.A., Kaloshina L.L.**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: natashabochkarewa@yandex.ru*

ANALYSIS OF MODERN EXPERIENCE OF RESTORATION, RECONSTRUCTION AND ADAPTATION OF GRAIN SILOS

Abstract. *The article identifies the main space-planning characteristics of grain silos and their city-forming role. The modern experience of restoration, reconstruction and adaptation of such structures in Russia and abroad is analyzed. The objectives, reasons for the preservation and adaptation of grain silos to the new urban space are considered. The article presents the research of Russian and foreign authors, studies examples of reconstruction and adaptation of these objects for various functions, identifies the main techniques and modifications carried out with elevator buildings. There are few examples of restoration and adaptation of such objects in Russia. The problem of demolition of grain silos remains relevant in our country, which indicates the need to analyze foreign experience and compile a model for integrating these objects into modern urban space. The article contains the results of a study on the functional conversion of grain silos: the main trends and directions. In result, it is conclude that the analysis of the implemented facilities and project proposals can become the basis for further work with such structures. This work may be of interest to specialists studying the preservation of industrial structures and their adaptation to a new environment with new social needs.*

Keywords: *reconstruction, adaptation, characteristics of grain elevators, reconstruction techniques, restoration of grain silos, reasons for the preservation of industrial facilities.*

REFERENCES

1. Tolkacheva T.V. The construction of an elevator system in Russia (on the example of the Samara province) in the late XIX- early XX centuries. [Stroitel'stvo elevatornoi sistemy v Rossii (na primere Samarskoi gubernii) v kontse XIX- nachale XX vekov]. Izvestiya PGPU named after V.G. Belinsky. 2012. No. 27. Pp. 1044–1046. (rus)
2. Fetisov O.I., Shenberger T. Analysis of the experience in adaptive reuse of industrial architecture with new social functions. Modern industrial and civil construction. 2013. No. 3(9). Pp. 141–151.
3. Salamanca Cascos D., Mateo Caballos C. Red Nacional de Silos. Integración en la realidad urbana andaluza y su reutilización para nuevas tipologías. Lámpara: patrimonio industrial. 2010. No. 3. Pp. 8–17
4. Bevilacqua M.G., De Falco A. Reusing grain silos from the 1930s in Italy. A multi-criteria decision analysis for the case of Arezzo. Journal of Cultural Heritage. 2018. Vol.29. Pp. 145–159 DOI:10.1016/j.culher.2017.07.009
5. Sysoeva O.I. Reconstruction of industrial facilities [Rekonstruktsiya promyshlennykh obektov: ucheb. posobie]. Minsk: BNTU, 2015. 136 p. (rus)
6. Tochina V.P., Popov A.D., Tankova N.A. Principles and methods of renovation of industrial facilities in the world practice [Printsipy i metody renovatsii promyshlennykh ob"ektov v mirovoi praktike]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 6. Pp. 78–82. DOI:10.34031/article_5d079e0ec02547.40724825 (rus)
7. Karasev R.O. Reorganization of industrial territories and architectural objects, taking into account adaptive processes [Reorganizatsiia promyshlennykh territorii i arkhitekturnykh ob"ektov s uchetom adaptivnykh protsessov]. Izvestiya KGASU. 2020. No. 2 (52). Pp.177–186. (rus)
8. Tsepilova O.P. Analysis of the experience of re-adaptation of industrial architecture [Analiz opyta povtorno adaptatsii promyshlennoi arkhitektury]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 12. Pp. 74–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90 (rus)

9. Bessarabova Y.I., Evtushenko-Mulukaeva N.M. Renovation and integration of industrial enterprises in the modern urban environment [Renovatsiya i integratsiya promyshlennykh prdpriyatii v sovremennuyu gorodskuyu sredu]. Scientific research journal. 2019. No. 3(81). Pp. 169–171. DOI: 10.23670/IRJ.2019.81.3.035 (rus)
10. Voloshin E.V. Elevators and warehouses: textbook. Part 2 [Elevatory i sklady]. Orenburg: OGU, 2019. 97 p.
11. Platonov P.N., Lebedinskii V.G., Faman V.S. Elevators and warehouses [Elevatory i sklady]. Moscow: Publ. Kolos, 1971. 311 p.(rus)
12. Chaiko D.S. Modern tendencies of a new use of historic industrial sites [Sovremennye tendentsii novogo ispolzovaniya istoricheskikh promyshlennykh ob"ekov]. International Research Journal. 2016. No.3(43). Pp. 47–51. DOI: 10.18454/IRJ.2227-6017 (rus)
13. Faraneh Sahraiyani, EgeUluca Tümer. Adaptive Reuse of Industrial Buildings: Case Study of Tenten Factory in Famagusta Journal of Engineering and Architecture. 2017. Vol. 5. No. 1. Pp. 50–60. DOI: 10.15640/jea.v5n1a6
14. Quakersquareinn: Akron Hotel and Silo. URL: <https://www.quakersquareakron.com/> (date of treatment: 28.02.2022)
15. Cobe: The Silo. URL: <https://www.cobe.dk/place/the-silo/> (date of treatment: 28.02.2022)
16. Archi.ru: Zeitz Museum of Contemporary Art Africa [Muzei sovremennogo afrikanskogo iskusstva Tsaitsa]. URL: <https://archi.ru/projects/world/8542/muzei-sovremennogo-afrikanskogo-iskusstva-caica/> (date of treatment: 28.02.2022)
17. Archdaily: The Tervahovi Silos. URL: <https://www.archdaily.com/887591/the-tervahovi-silos-pave-architects> (date of treatment: 28.02.2022)
18. Fax Architects: MIFANGCEL PLAZA PROJECT. URL: <http://www.f-a-x.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=9&id=110> (date of treatment: 28.02.2022)
19. Archdaily: RSAA's Kunstsilo Proposal Accentuates, Preserves, and Modifies Historical Silo in Norway. URL: https://www.archdaily.com/796698/rsaas-artcube-proposal-accentuates-preservers-and-modifies-historical-silo-in-norway?ad_medium=gallery (date of treatment: 28.02.2022)
20. Koko: Rotermann grain elevator. URL: <http://www.koko.ee/en/projects/type/all-types/project/78-rotermanni-elevator> (date of treatment: 28.02.2022)
21. Dianova-Klokova I.V., Metaniev D.A., Khrustalev D.A. On the issue of innovative transformation of the space of monuments of industrial architecture. [K voprosu ob innovatsionnom preobrazovanii prostranstva pamiatnikov industrial'noi arkhitektury]. System technologies. 2021. No. 38. Pp. 167–179. (rus)
22. Tribelskaya E.G., Moskovtseva A.M. Features of renovation of agro-industrial complexes (on the example of elevators) [Osobennosti renovatsii agropromyshlennykh kompleksov (na primere elevatorov)]. System technologies. 2019. No. 32. Pp. 84-95. (rus)
23. Megabudka: Revitalization of the elevator territory. [Revitalizatsiia territorii elevatora.]. URL: <https://megabudka.ru/posts/1916> (date of treatment: 28.02.2022) (rus)
24. Chadovich A.A. Preservation and demolition? Compromise! [Sokhranenie ili snos? Kompromiss!]. Architecture and modern information technologies. 2013. No. 1(22). Pp. 1–13. (rus)

Information about the authors

Bochkareva, Natalia A. Master's Student of the Department of Architectural and Urban Heritage. E-mail: natashabochkarewa@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St.,4.

Kaloshina, Lyudmila L. Associate Professor of the Department of Architectural and Urban Heritage. E-mail: milakarus@yandex.ru. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St.,4.

Received 14.03.2022

Для цитирования:

Бочкарева Н.А., Калошина Л.Л. Анализ современного опыта реставрации, реконструкции и приспособления зерновых элеваторов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 78–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-78-90

For citation:

Bochkareva N.A., Kaloshina L.L. Analysis of modern experience of restoration, reconstruction and adaptation of grain silos. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 78–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-78-90

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-91-100

Трубицын М.А., Лисняк В.В., Фурда Л.В., Воловичева Н.А., Тарасенко Е.А.Белгородский государственный национальный исследовательский университет***E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru*

ДЕФЛОКУЛЯЦИЯ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ МАТРИЧНЫХ СИСТЕМ ДОБАВКАМИ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫХ ЭФИРОВ

Аннотация. В настоящей работе представлен сравнительный анализ эффективности дефлокулирующего действия российских и зарубежных добавок поликарбоксилатных эфиров на реологические свойства высокоглиноземистых матричных суспензий. Для приготовления функциональных матричных систем использовали субмикронный активированный α -оксид алюминия и модифицированный высокоглиноземистый цемент в соотношении 80:20 и 90:10 масс. % соответственно. Проведена оценка текучести исследуемых матричных суспензий с влажностью 20 % в присутствии дефлокулянтов различной концентрации. Все марки добавок продемонстрировали достаточно высокий дефлокулирующий эффект по отношению к исследуемым высокоглиноземистым матричным суспензиям. Лучшая текучесть была зафиксирована у матричных суспензий, дефлокулированных Синтефлоу ДУО 60 (0,38 %). Отмечено влияние количества добавок на время истечения. Степень загустевания матричных суспензий в течение 30 мин экспозиции во многом определяется типом и количеством вводимых дефлокулянтов. Изучено влияние дефлокулирующих добавок поликарбоксилатных эфиров на растекаемость. Для исследуемых литьевых смесей с влажностью 12 % максимальный разжижающий эффект оказывает добавка Синтефлоу ДМ 50 (0,34 %). Дефлокулянты на основе поликарбоксилатных эфиров производства ГК «Синтез ОКА» (Россия) показали сопоставимую эффективность по сравнению с комплексным дефлокулянтом Perapin AL 200 и Perapin AL 300 (Kerneos, Франция).

Ключевые слова: функциональные матричные смеси, дефлокулянты, поликарбоксилатные эфиры, суспензии, текучесть, вязкость, низкоцементные литейные массы.

Введение. В настоящее время огнеупорные литьевые массы с низким содержанием высокоглиноземистого цемента находят широкое применение в различных областях промышленности [1–3]. Достоинствами таких материалов является хорошая технологичность, а также достаточно высокие эксплуатационные характеристики.

Важное значение при разработке низкоцементных литьевых масс имеют их реотехнологические свойства, в частности текучесть [4–7]. Как известно, состав подобных неформованных материалов включает огнеупорный наполнитель и функциональную матричную систему (далее ФМС). Матрица составляет примерно 25–35 % композиционного материала. Основными компонентами ФМС являются высокодисперсные минеральные добавки, прежде всего реактивный оксид алюминия, и ограниченное количество высокоглиноземистого цемента. Именно матрица оказывает решающее влияние на удобоукладываемость и термомеханические свойства литьевых масс.

Согласно [8], ФМС обладает свойством непрерывности и консолидирует в единое целое полифракционные зерна наполнителя. Это придает монолитность и заданную форму теплотехнической футеровке, а также обеспечивает передачу

механических и термических напряжений на наполнитель и защищает материал от коррозионных воздействий.

Отличительным признаком матричной системы теплотехнических огнеупорных композиций является предельно высокая степень объемной концентрации, достигаемая за счет плотной укладки полидисперсных частиц твердой фазы, а также за счет оптимальной дефлокуляции (разжижения).

Важную роль при изготовлении саморастекающихся литьевых масс играют дефлокулирующие добавки, которые обеспечивают оптимальную подвижность таких масс при пониженном содержании воды. В качестве дефлокулянтов широко используют полифосфаты и полиакрилаты натрия [9–11]. В последние годы весьма эффективным оказалось введение добавок на основе поликарбоксилатных эфиров (ПКЭ) [12–14]. Как результат, ФМС в сочетании с дефлокулянтами, а, соответственно, и низкоцементные литьевые массы приобретают улучшенные реотехнологические свойства. Высокая дефлокулирующая способность поликарбоксилатных эфиров зависит, в первую очередь, от строения основной цепи, плотности заряда, количества и состава боковых цепей (рис. 1).

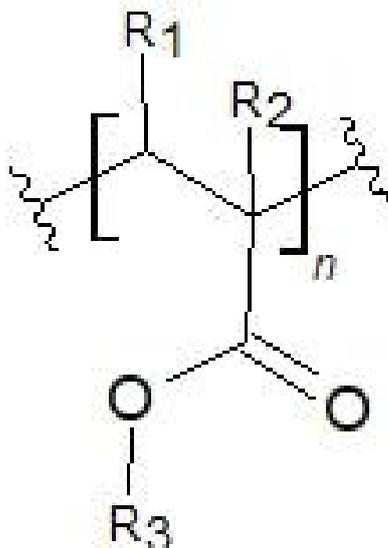


Рис. 1. Структура молекулы поликарбоксилатного эфира

Наличие заряда основной цепи обеспечивает адсорбцию молекул ПКЭ на поверхности минеральных частиц. Это приводит к созданию электростатического эффекта, а боковые цепочки обеспечивают стерический эффект диспергирования. Введение добавок поликарбоксилатных эфиров позволяет существенно понизить количество технологической воды без ухудшения реологических свойств системы.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ эффективности дефлокулирующего действия российских и зарубежных добавок поликарбоксилатных эфиров на реологические

свойства высокоглиноземистых матричных суспензий.

Методология. Для приготовления ФМС использовали субмикронный активированный α -оксид алюминия (СМАЛОКС-А) и модифицированный высокоглиноземистый цемент (МВГЦ). СМАЛОКС-А получали методом сухого помола из высокоглиноземистого сырья в α -форме [15]. МВГЦ готовили измельчением высокоглиноземистого клинкера, полученного обжигом порошковой смеси CaCO_3 и Al_2O_3 при 1450°C [16].

Физико-химические характеристики исходных компонентов исследуемых систем изучали методами аналитической сканирующей электронной микроскопии (FEI Quanta 200 3D и Quanta 600 FEG, Нидерланды) и рентгенофазового анализа (дифрактометр Ultima IV, Rigaku, Япония). Химический состав материалов определяли методом рентгеноспектрального микроанализа с использованием электронно-ионного растворного микроскопа Quanta – 200 3D, совмещенного с энергодисперсионным рентгеновским детектором EDAX. Изучение гранулометрического состава проводили на анализаторе размеров частиц «Microtrac S3500» (США) методом лазерной дифракции. В качестве дисперсионной среды при исследовании использовали дистиллированную воду для СМАЛОКС-А и этанол – для МВГЦ.

Химический состав СМАЛОКС-А и МВГЦ представлен в таблице 1

Таблица 1

Химический состав компонентов ФМС

№	Образец	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	Na_2O
1	СМАЛОКС-А	99,68	0,02	0,03	0,02	-	0,12
2	МВГЦ	70,50	0,28	0,15	27,85	0,12	0,17

Минералогический состав образца СМАЛОКС-А представлен кристаллической фазой α - Al_2O_3 (не менее 98 масс. %). Для образца МВГЦ характерно наличие двух фаз – моноалюмината

(СА) – 68,5 масс. % и диалюмината (CA_2) – 31,5 масс. %.

Гранулометрический состав исходных компонентов представлен в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

Гранулометрический состав компонентов ФМС

№	Образец	D20, мкм	D50, мкм	D90, мкм
1	СМАЛОКС-А	0,94	2,4	8,34
2	МВГЦ	1,31	3,77	19,0

СМАЛОКС-А имеет выраженный бимодальный характер распределения частиц по размерам, при этом пик первой моды соответствует частицам со средним диаметром 0,3–0,4 мкм, а второй – 2,0–3,0 мкм (рис. 2а).

Порошок МВГЦ также характеризуется бимодальным распределением. При этом максимум

первой моды соответствует частицам со средним диаметром 2 мкм, вторая мода соответствует частицам, чей размер лежит в пределах от 10,0 до 11,0 мкм (рис. 2б).

На рисунке 3 представлены данные сканирующей электронной микроскопии для образцов СМАЛОКС-А и МВГЦ.

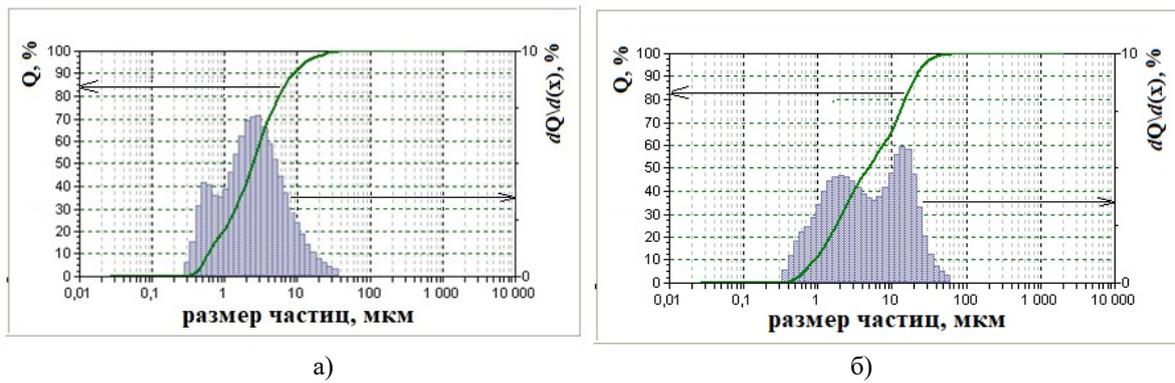


Рис. 2. Интегральная кривая и диаграмма распределения частиц компонентов ФМС: а) СМАЛОКС-А; б) МВГЦ

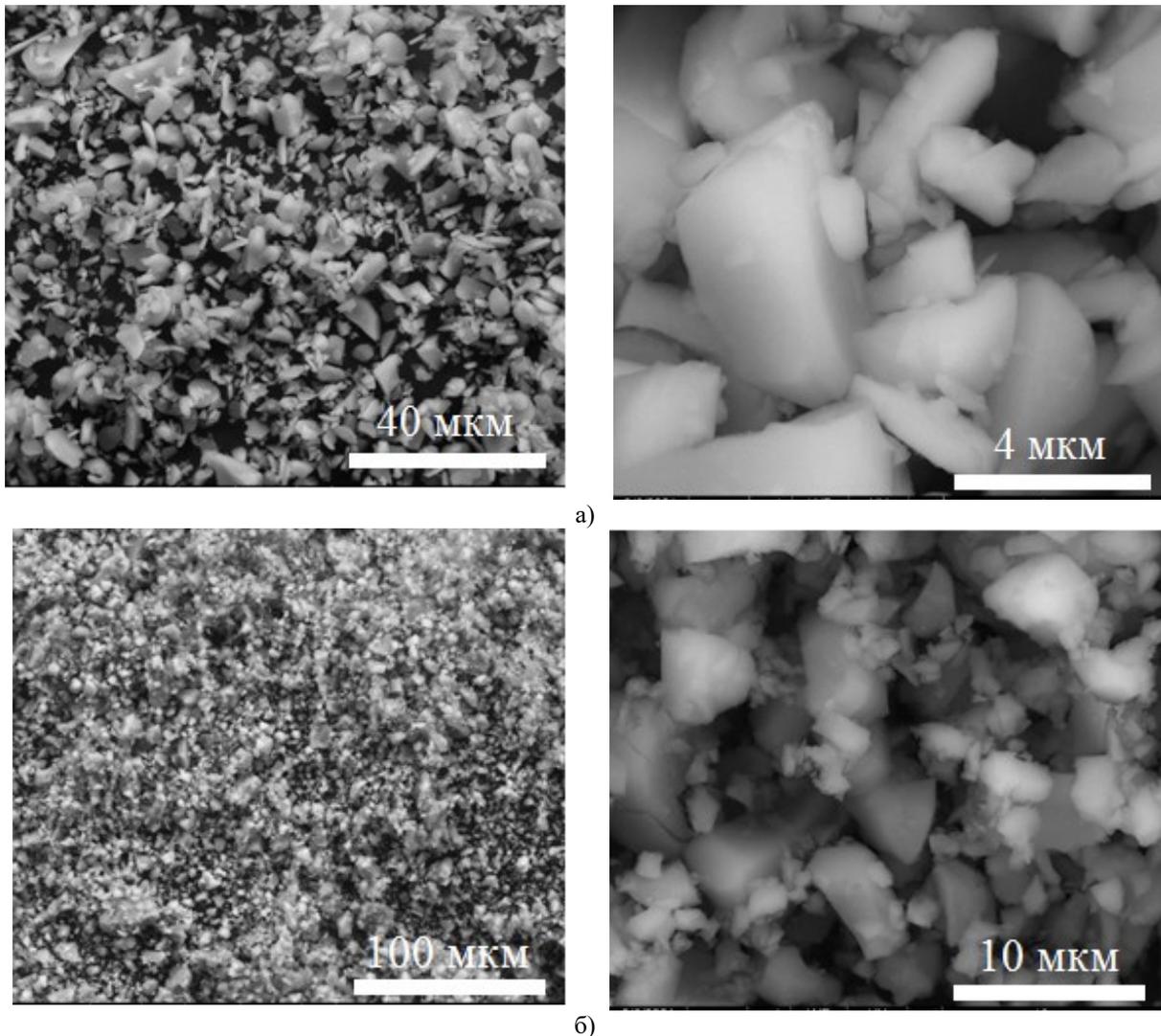


Рис. 3. СЭМ-микрофотографии образцов: а) СМАЛОКС-А; б) МВГЦ

Следует отметить, что на микрофотографиях СЭМ для СМАЛОКС-А имеются частицы двух типов: более крупные призматические кристаллиты (средний размер 3-4 мкм) и пластинки изометричной формы (средний размер менее 1 мкм). Частицы МВГЦ представляют собой зерна изометричной конфигурации от 1,5 до 5,0 мкм.

Также детектируются пластинчатые частицы неправильной остроугольной формы, средним размером до 1,0 мкм.

В настоящей работе готовили две серии образцов ФМС исходя из соотношения СМАЛОКС-А:МВГЦ = 80:20 масс. % (индекс состава СЦ-82). и СМАЛОКС-А:МВГЦ = 90:10

масс. % (индекс состава СЦ-91). Навеску порошкообразных ФМС рассчитывали с учетом получения водной суспензии объемом не менее 150 см³ (для исследования на текучесть) или не менее 50 см³ (для исследования на растекаемость).

Необходимое количество порошков СМАЛОКС-А и МВГЦ взвешивали на техно-химических весах и перемешивали шпателем в течение 1 минуты. Затем добавляли требуемое количество дистиллированной воды вместе с дефлокулянтom и перемешивали в течение 3 минут при помощи ручного миксера до получения од-

нородной суспензии. Для всех исследуемых матричных суспензий влажность (W) составляла 20 масс. %.

В качестве дефлокулянтов использовали ПКЭ отечественного производства, предоставленные группой компаний «Синтез ОКА». В качестве зарубежного аналога для сравнения были выбраны ПКЭ Peramin AL 200 и Peramin AL 300 («Korneos», Франция). Стоит отметить, что в случае использования Peramin максимальный эффект достигается при добавлении смеси двух отдельных продуктов Peramin AL 200 и Peramin AL 300, взятых в соотношении 1:1. Концентрации и марки ПКЭ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Характеристики используемых дефлокулирующих добавок

Марка	Аббревиатура	Механизм действия	Исследуемые количества добавки, масс. %
Синтефлоу Мега 50*	М50	Водоредуктор	0,17 и 0,34
Синтефлоу Мега 52*	М 52	Высокоэффективный водоредуктор с увеличенным набором ранней прочности и ограниченной сохранностью бетонной смеси.	0,17 и 0,34
Синтефлоу Мега 70*	М 70	Эффективный водоредуктор	0,17 и 0,34
Синтефлоу ДУО 60*	ДУО 60	Универсальный водоредуктор	0,19 и 0,38
Синтефлоу Сенситив 50*	С 50	Увеличители длительности подвижной фазы	0,21 и 0,42
Синтефлоу ДМ 50 **	ДМ 50	Дегидратированная марка Мега 50	0,17 и 0,34
Peramin AL200 + Al 300 (1:1)**	Peramin	Водоредуктор	0,17 и 0,34

* – водный раствор

** – сухой порошок

Исследуемые количества ПКЭ выбирались исходя из представленных в литературе данных [17-19] и согласно рекомендациям производителя ГК «Синтез Ока».

Текучесть исследовали с помощью вискозиметра Энглера с выходным отверстием 5,4 мм. Для этого измеряли продолжительность истечения суспензии в начальный момент времени (τ_0) и через 30 минут выдержки в вискозиметре (τ_{30}). На основании полученных данных рассчитывали коэффициент загустеваемости (КЗ) как отношение $KЗ = \tau_{30}/\tau_0$.

Влияние добавок поликарбоксилатных эфиров на саморастекаемость матричной суспензии изучали следующим образом. Форму-миниконус с верхним отверстием диаметром 2 см, нижним отверстием диаметром 4 см и высотой 5 см устанавливали на ровную горизонтальную поверхность. Полученную литевую смесь укладывали в форму через верхнее отверстие до полного заполнения миниконуса и выдерживали в течение 60±5 с. Затем форму плавно поднимали строго в вертикальном направлении и измеряли диаметр

расплыва в двух взаимно перпендикулярных направлениях, результат округляли до 1 мм.

За растекаемость принимали среднеарифметическое значение результатов двух измерений, расхождение между которыми не должно быть более 10 мм. Индекс растекаемости рассчитывали по формуле [8]:

$$IP = [(d_2 - d_1) / d_1] \times 100\%,$$

где d_1 и d_2 – диаметр нижней части конуса и расплыва после растекания соответственно.

Основная часть. На первом этапе проводили сравнительную оценку текучести матричных суспензий СЦ-91 и СЦ-82 влажностью 20 %, дефлокулированных ПКЭ. Стоит отметить, что эталонные образцы (без добавки дефлокулянта) с аналогичной влажностью представляли собой пасты с высокой вязкостью, у которых текучесть отсутствовала.

Дефлокулирующее действие различных марок ПКЭ на матричные суспензии представлено на рисунке 4.

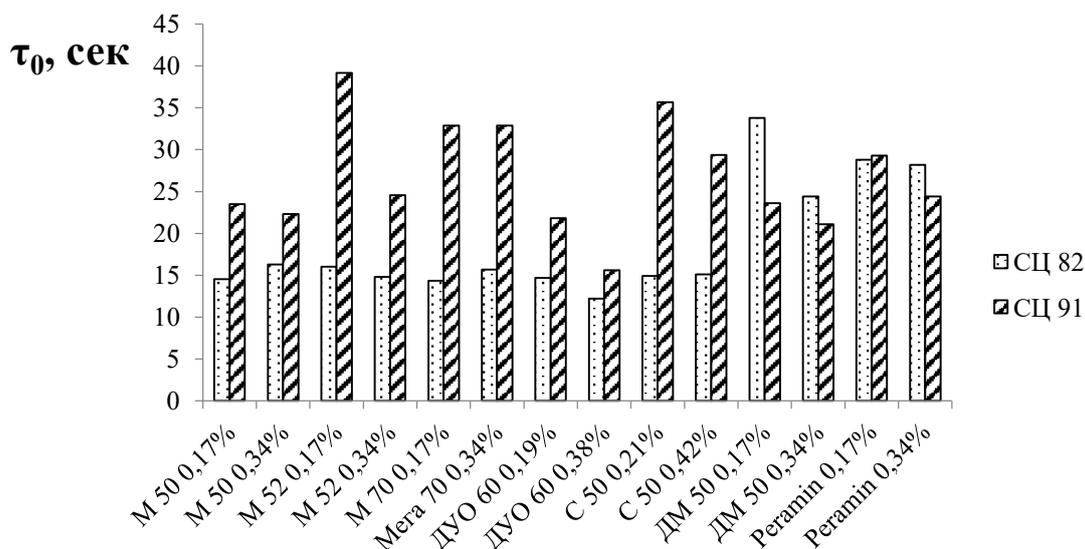


Рис. 4. Текучесть суспензий ФМС, дефлокулированных различными марками ПКЭ (τ_0 , $W_c=20\%$)

Согласно данным рисунка 4, все марки добавок, приготовленные на основе поликарбоксилатных эфиров, продемонстрировали достаточно высокий дефлокулирующий эффект по отношению к исследуемым высокоглиноземистым матричным суспензиям. Для образцов составов СЦ-82 и СЦ-91 величина τ_0 имеет сопоставимые значения и варьируется в диапазоне 12–34 и 16–39 сек. соответственно. Лучшая текучесть была зафиксирована у матричных суспензий, дефлокулированных ДУО 60 (0,38%), где для СЦ-82 и СЦ-91 значения τ_0 составили 12 и 15 сек. соответственно. Стоит отметить влияние количества добавок на время истечения. Повышение количества ПКЭ в интервале изученных концентраций

понижает время истечения для всех образцов за исключением состава СЦ-82 с добавкой С 50.

Сухой дефлокулянт Peramin показал сопоставимую эффективность с российским аналогом ДМ 50. Значения текучести при повышении количества вводимого дефлокулянта практически не изменяется. Показатель τ_0 в случае добавки Peramin 0,17 % и 0,34 % для состава СЦ-82 равен 29 и 28 сек., а для состава СЦ-81 равен 29 и 24 сек. соответственно.

На рисунке 5 приведена сравнительная оценка величины коэффициента загустевания (КЗ) для матричных суспензий составов СЦ-82 и СЦ-91 при $W=20$ масс.%.

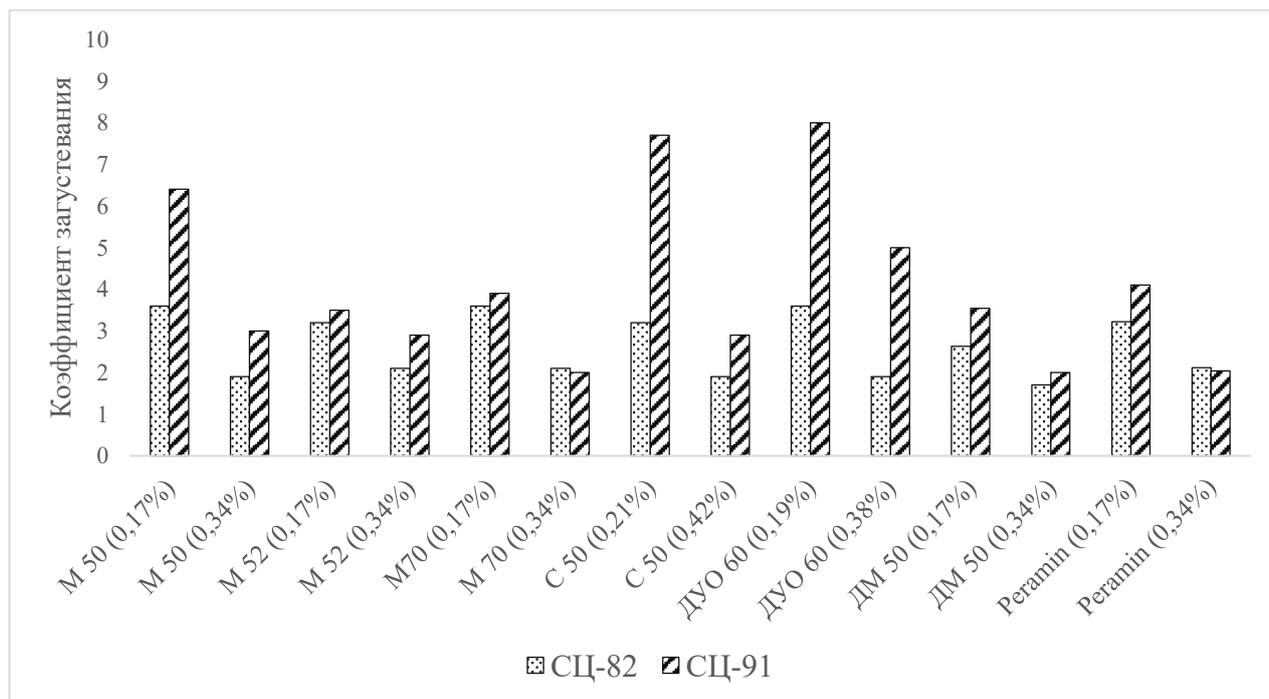


Рис. 5 Коэффициент загустевания систем СЦ-91 и СЦ-82 в присутствии различных дефлокулирующих добавок ($W=20$ масс.%)

Согласно данным рисунка 5, степень загустевания матричных суспензий в течение 30 мин. экспозиции во многом определяется типом и количеством вводимых поликарбоксилатных добавок.

Так, для состава СЦ-91 при низких концентрациях добавок ПКЭ коэффициент загустевания как правило имеет более высокие значения КЗ по сравнению с высокими концентрациями дефлокулянтов: 3,5 – 8,0 и 2,0 – 5,0 соответственно. Максимальные значения КЗ наблюдаются у образцов с добавкой С 50 (0,21 %) и ДУО 60 (0,17 %). Следует отметить, что для сухих порошков ДМ 50 и Peramin величина КЗ принимает близкие значения во всем интервале изученных концентраций. Например, при содержании ПКЭ 0,17 % данная величина равна 3,54 – 4,10, а для 0,34 % около 2.

В случае матричных суспензий состава СЦ-82 значения коэффициента загустевания для всех исследуемых поликарбоксилатных добавок находятся в более узком интервале 1,70–3,60. Это сви-

детельствует о большей стабильности данной литьевой системы по отношению к матричным составам СЦ-91. Повышение количества вводимых добавок ПКЭ также вызывает понижение КЗ для всех исследуемых образцов. Наименьшее значение коэффициента загустевания наблюдается для ДМ 50 (0,34 %) и составляет 1,70. Эффективность дефлокулирующей добавки ДМ 50 сопоставима с Peramin.

На втором этапе проводили изучение растекаемости матричных литьевых смесей. В качестве объектов исследования были выбраны функциональные матричные смеси состава СЦ-82. Для дефлокуляции использовали добавки на основе поликарбоксилатных эфиров – ДМ 50, ДУО 60 и Peramin, взятые в различных количествах. Испытания проводили на литьевых смесях с влажностью 12 % при помощи формы-миниконуса (рис. 6).

На рисунке 7 представлены результаты определения индекса растекаемости для исследуемых литьевых смесей.

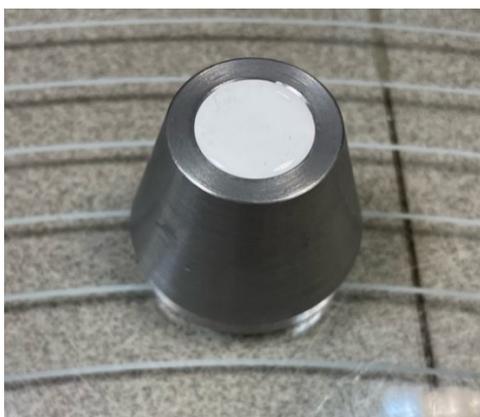


Рис. 6. Испытание литьевых смесей на растекаемость

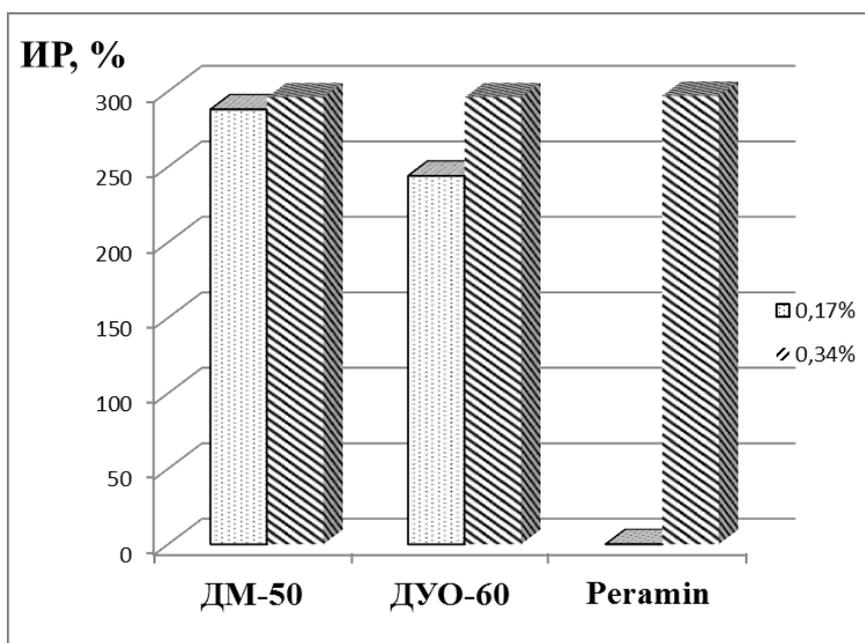


Рис. 7. Зависимость индекса растекаемости от количества добавки ПКЭ

Сравнительный анализ действия дефлокулянтов показал, что для исследуемых литевых смесей с влажностью 12 % максимальный дефлокулирующий эффект оказывает добавка ДМ 50 (0,34 %). В тоже время литевая смесь с добавкой Pegamin (0,17 %) при данной влажности не растекается. Хорошие показатели саморастекаемости в присутствии Pegamin достигаются только при увеличении ее количества в 2 раза. Также следует отметить, что при концентрации 0,34 % поликарбоксилатные добавки ДУО 60, ДМ 50 и Pegamin обеспечивают сопоставимую растекаемость литевых смесей.

Выводы. Исследовано влияние дефлокулирующих добавок на основе поликарбоксилатных эфиров на высокоглиноземистые функциональные матричные системы. Лучшая текучесть была зафиксирована у матричных суспензий, дефлокулированных ДУО 60 (0,38 %), где для СЦ-82 и СЦ-91 значения τ_0 составили 12 и 15 с соответственно. Отмечено влияние количества добавок на время истечения. Степень загустевания матричных суспензий в течение 30 мин экспозиции во многом определяется типом и количеством вводимых дефлокулянтов.

Установлено, что в случае матричных суспензий состава СЦ-82 значения коэффициента загустевания для всех исследуемых поликарбоксилатных добавок находятся в более узком интервале 1,70–3,60. Это свидетельствует о большей стабильности данной литевой системы по отношению к матричным составам СЦ-91.

Изучено влияния дефлокулирующих добавок ПКЭ на растекаемость. Для исследуемых литевых смесей с влажностью 12 % максимальный разжижающий эффект оказывает добавка ДМ 50 (0,34 %).

Дефлокулянты на основе поликарбоксилатных эфиров производства ГК «Синтез Ока» (Россия) показали сопоставимую эффективность по сравнению с комплексным дефлокулянтом Pegamin AL 200 + AL 300 (Kerneos, Франция).

Источник финансирования. Работа выполнена в НИУ БелГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения от 14.12.2020 г. № 075-11-2020-038 о реализации комплексного проекта «Создание импортозамещающего производства компонентов матричных систем и теплотехнических композиционных материалов нового поколения на их основе» согласно Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. №218.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов В.А., Гаспарян М.Д. Огнеупоры для стекольной промышленности // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. №7. С. 26–30.
2. Мигаль В.П., Скурихин В.В. Высокоглиноземистые цементы Cembor для огнеупорных бетонов с низким содержанием цемента// Огнеупоры и техническая керамика. 2012. №2. С. 13–17
3. Плетнев П.М., Погребенков В.М., Верещагин В.И., Тюлькин Д.С. Корундовый огнеупорный материал на глиноземистой связке, стойкий к высокотемпературным деформациям//Новые огнеупоры.2018. №2. С. 47–52.
4. Benjeddou O., Soussi C., Jedidi M., Benali M. Experimental and theoretical study of the effect of the particle size of limestone fillers on the rheology of self-compacting concrete//J. of Building Engineering. Vol. 10. 2017. Pp. 32–41. DOI: 10.1016/j.job.2017.02.003
5. Zhou X., Sankaranarayanan K., Rigaud M. Design of bauxite-based low-cement pumpable castables: a rheological approach// Ceramics International. 2004.Vol.30. Iss. 1. Pp. 47–55. DOI: 10.1016/S0272-8842(03)00060-9
6. Pillegi R.G., Studart A.R., Pandolfelli V.C., Gallo J. How mixing affects the rheology of refractory castables, Part 2// American Ceramic Society Bulletin. 2001. Vol. 80. Iss. 7. Pp. 38–42.
7. Assaad J., Kamal K., Habib M. Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete//ACI Materials journal. 2003. Vol.100. Iss. 2. Pp. 99–107.
8. Пивинский Ю. Е. Керамические и огнеупорные материалы: избр. тр. Т. 2. СПб.: Стройиздат СПб. 2003. 668 с.
9. Otroj S., Bahrevan M.A., Mostarzadeh F., Nilforoshan M.R. The effect of defloculants on the self-flow characteristics of ultra low-cement castables in Al_2O_3 –SiC–C system // Ceramics International. 2005. Vol. 31. Iss. 5. Pp. 647–653. DOI: 10.1016/j.ceramint.2004.06.023
10. Ltifi M., Guerferch A., Mounanga P. Effects of sodium tripolyphosphate addition on early-age physico-chemical properties of cement pastes // Procedia Engineering. 2011. Vol.10. Pp. 1457–1462. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.242
11. Питак Я.Н., Песчанская В.В., Наумов О.С., Онасенко Ю.А. Влияние поверхностно-активных веществ на свойства низкоцементного корундового бетона // Огнеупоры и техническая керамика. 2011. №1-2. С. 36–39.
12. Халиков Р.М., Иванова О.В., Короткова Л.Н., Синицин Д.А. Супрамолекулярный механизм влияния поликарбоксилатных суперпластификаторов на управляемое твердение строитель-

ных нанокompозитов // Нанотехнологии в строительстве. 2020. Т.12. №5. С. 250–255. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-250-255

13. Богданов Р.Р., Пашаев А.В., Журавлев М.В. Влияние пластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата и полиарила на физико-технические свойства цементных композиций // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. №11. С. 45–49.

14. Журавлева М.И., Иванова О.В., Халиков Р.М. Управление технологическими характеристиками вяжущих материалов поликарбоксилатными суперпластификаторами // Сб. XII Международ. конф. «Актуальные проблемы науки и техники-2019». Уфа: Изд-во «УГНТУ». 2019. Т. 2. С. 111–113.

15. Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Скрипников Н.С. Исследование влияния технологических параметров на гранулометрические характеристики субмикронного оксида алюминия в α -форме // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. Т. 6. № 12. С. 84–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-84-97

16. Трубицын М.А., Япрынец М.Н., Фурда Л.В., Воловичева Н.А., Кузин В.И., Зубаченко Р.В. Влияние режимов термообработки на процесс синтеза кальций-алюминатных фаз в технологии особо чистого высокоглиноземистого цемента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 2. С. 84–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-84-93

17. Demidova-Buizine I., Pundiene I. Effect of amount of deflocculant on change in physico-mechanical properties of medium-cement heat-resistant concretes during drying and heat treatment // Refractories and Industrial Ceramics. 2014. Vol. 55. №. 2. Pp. 121–127.

18. Sarkar R., Samant A.D. Study on the Effect of Deflocculant Variation in High-Alumina Low-Cement Castable // InterCeram: International Ceramic Review. 2016. Pp. 28–34.

19. Parr C., Assis G., Fryda H., Li S. Additives for High Purity Reduced Cement Castables // Refractories WORLDFORUM. 2010. №2. Pp. 87–91.

Информация об авторах

Трубицын Михаил Александрович, кандидат технических наук, профессор кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Лисняк Виктория Владимировна, аспирант кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Фурда Любовь Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: furda@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Воловичева Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Тарасенко Евгения Андреевна, ассистент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: tarasenko_ea@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Поступила 17.04.2022 г.

© Трубицын М.А., Лисняк В.В., Фурда Л.В., Воловичева Н.А., Тарасенко Е.А., 2022

***Trubitsyn M.A., Lisnyak V.V., Furda L.V., Volovicheva N.A., Tarasenko E.A.**

Belgorod National Research University

**E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru*

DEFLOCCULATION OF HIGH ALUMINA MATRIX SYSTEMS WITH POLYCARBOXYLATE ETHER ADDITIVES

Abstract. A comparative analysis of the effectiveness of the deflocculating effect of Russian and international polycarboxylate ethers additives on the rheological properties of high-alumina matrix suspensions is presented in this article. For the production of functional matrix systems, submicron activated α -alumina and modified high alumina cement are used in the ratio of 80:20 and 90:10 wt. %, respectively. A fluidity of matrix

suspensions with a moisture content of 20% is carried out to assess the presence of different deflocculants concentrations. All grades are manifested by rather high deflocculating effects in identifying high-alumina matrix suspensions. The best fluidity is recorded for matrix suspensions deflocculated with Cinteflow DUO 60 (0.38 %). A large influence on the expiration time is noted. Probability of thickening of matrix suspensions within 30 min. illumination is largely determined by the type and influence of the introduced deflocculants. The effect of deflocculating polycarboxylate ethers on spreadability has been studied. For certain casting mixtures with a moisture content of 12 %, the maximum diluting effect of using Sinteflow DM 50 (0.34 %). Deflocculants based on polycarboxylate ethers produced by the Sintez OKA Group of Companies (Russia) show impressive efficiency compared to the complex deflocculant Peramin AL 200 and Peramin AL 300 (Kerneos, France).

Keywords: functional matrix mixtures, deflocculants, polycarboxylate ethers, suspensions, fluidity, viscosity, low-cement castables.

REFERENCES

1. Sokolov V.A., Gasparyan M.D. Refractories for the glass industry [Ogneupory dlya stekol'noj promyshlennosti]. Refractories and Industrial Ceramics. 2008. No 7. Pp. 26–30. (rus)
2. Migal' V.P., Skurihin V.V. Cembor High Alumina Cements for Low Cement Refractory Concrete [Vysokoglinozemistye cementy Cembor dlya ogneupornyh betonov s nizkim sodержaniem cementa]. Refractories and Industrial Ceramics. 2012. No 2. Pp. 13–17. (rus)
3. Pletnev P.M., Pogrebenkov V.M., Vereshchagin V.I., Tyul'kin D.S. Corundum refractory material on an aluminous bond, resistant to high-temperature deformations [Korundovyy ogneupornyj material na glinozemistoj svyazke, stojkij k vysokotemperaturnym deformacijam]. New refractories. 2018. No 2. Pp. 47–52. (rus)
4. Benjeddoua O., Soussi C., Jedidi M., Benali M. Experimental and theoretical study of the effect of the particle size of limestone fillers on the rheology of self-compacting concrete. J. of Building Engineering. Vol. 10. 2017. Pp. 32–41.
5. Zhou X., Sankaranarayanan K., Rigaud M. Design of bauxite-based low-cement pumpable castables: a rheological approach. Ceramics International. 2004. Vol.30. Iss. 1. Pp. 47–55.
6. Pillegi R.G., Studart A.R., Pandolfelli V.C., Gallo J. How mixing affects the rheology of refractory castables, Part 2. American Ceramic Society Bulletin. 2001. Vol. 80. Iss. 7. Pp. 38–42.
7. Assaad J., Kamal K., Habib M. Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. ACI Materials journal. 2003. Vol. 100. Iss. 2. Pp. 99–107.
8. Pivinskij Yu.E. Ceramic and Refractory Materials. [Keramicheskie i ogneupornye materialy: izbr. tr.] Vol. 2. SPb.: Strojizdat SPb. 2003. 668 p. (rus)
9. Otraj S., Bahrevar M.A., Mostarzadeh F., Nilforoshan M.R. The effect of deflocculants on the self-flow characteristics of ultra low-cement castables in Al₂O₃-SiC-C system. Ceramics International. 2005. Vol. 31. Iss. 5. Pp. 647–653.
10. Ltifi M., Guerferch A., Mounanga P. Effects of sodium tripolyphosphate addition on early-age physico-chemical properties of cement pastes. Procedia Engineering. 2011. Vol.10. Pp. 1457–1462.
11. Pitak Ya.N., Peschanskaya V.V., Naumov O.S., Onasenko Yu.A. The effect of surfactants on the properties of low-cement corundum concrete. [Vliyanie poverhnostno-aktivnyh veshchestv na svoistva nizkocementnogo korundovogo betona]. Refractories and Industrial Ceramics. 2011. No 1-2. Pp. 36–39. (rus)
12. Halikov R.M., Ivanova O.V., Korotkova L.N., Sinicin D.A. Supramolecular mechanism of the influence of polycarboxylate superplasticizers on controlled hardening of building nanocomposites [Supramolekulyarnij mekhanizm vliyaniya polikarboksilatnyh superplastifikatorov na upravlyaemoe tverdenie stroitel'nyh nanokompozitov]. Nanotechnologies in construction. 2020. Vol.12. No 5. Pp. 250–255. (rus)
13. Bogdanov R.R., Pashaev A.V., Zhuravlev M.V. Influence of plasticizing additives based on polycarboxylate ether and polyaryl on the physical and technical properties of cement compositions [Vliyanie plastificiruyushchih dobavok na osnove efira polikarboksilata i poliarila na fiziko-tekhnicheskie svoistva cementnyh kompozicii]. ulletin of the Technological University. 2018. Vol. 21. No 11. Pp. 45–49. (rus)
14. Zhuravleva M.I., Ivanova O.V., Halikov R.M. Management of technological characteristics of binders by polycarboxylate superplasticizers [Upravlenie tekhnologicheskimi harakteristikami vyazhushchih materialov polikarboksilatnymi superplastifikatorami]. Sat. XII Intern. conf. "Actual problems of science and technology-2019". Ufa: Izd-vo «UGNTU». 2019. Vol. 2. Pp. 111–113. (rus)
15. Trubicyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Skrypnikov N.S. Study of the influence of technological parameters on the granulometric characteristics of submicron alumina in α -form [Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov na granulometricheskie harakteristiki submikronnogo oksida alyuminiya v α -forme]. Bulletin of BSTU

named after V.G. Shukhov. 2021. Vol. 6. No 12. Pp. 84–97. (rus)

16. Trubitsyn M.A., Yaprincev M.N., Furda N.A., Volovicheva N.A., Kuzin V.I., Zubashchenko R.V. Influence of heat treatment modes on the process of synthesis of calcium aluminate phases in the technology of specially pure high aluminum cement [Vliyanie rezhimov termoobrabotki na process sinteza kal'cij-alyuminatnyh faz v tekhnologii osobo chistogo vysokoglinozemistogo cementa]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. Vol. 7. No 2. Pp. 84–97. (rus)

17. Demidova-Buizine I., Pundiene I. Effect of amount of deflocculant on change in physico-mechanical properties of medium-cement heat-resistant concretes during drying and heat treatment. Refractories and Industrial Ceramics. 2014. Vol. 55. No. 2. Pp. 121–127.

18. Sarkar R., Samant A.D. Study on the Effect of Deflocculant Variation in High-Alumina Low-Cement Castable. InterCeram: International Ceramic Review. 2016. Pp. 28–34.

19. Parr C., Assis G., Fryda H., Li S. Additives for High Purity Reduced Cement Castables. Refractories WORLDFORUM. 2010. No. 2. Pp. 87–91.

Information about the authors

Trubitsyn, Mikhail A. PhD, Professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Lisnyak, Viktoriya V. Postgraduate student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Furda, Lyubov V. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: furda@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Volovicheva, Natalya A. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Tarasenko, Evgeniya A. Assistant of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: tarasenko_ea@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Received 17.04.2022

Для цитирования:

Трубицын М.А., Лисняк В.В., Фурда Л.В., Воловичева Н.А., Тарасенко Е.А. Дефлокуляция высокоглиноземистых матричных систем добавками поликарбоксилатных эфиров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-91-100

For citation:

Trubitsyn M.A., Lisnyak V.V., Furda L.V., Volovicheva N.A., Tarasenko E.A. Deflocculation of high alumina matrix systems with polycarboxylate ether additives. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-91-100

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-101-109

*Любимый Н.С., Польшин А.А., Лозовая С.Ю., Тихонов А.А., Герасимов М.Д.,
Лямина С.А., Голубева Н.Д.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: nslubim@bk.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОНФОРМНЫХ КАНАЛОВ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПРЕСС-ФОРМ

Аннотация. В статье рассматривается вопрос повышения эффективности работы композитной металл-металлополимерной пресс-формы. Использование композитной пресс-формы, включающей формообразующую плиту, состоящую из металла и металлополимера, сопряжено с низкой эффективностью охлаждения такой пресс-формы. По этой причине очень важно разработать технологические решения, обеспечивающие эффективную работу системы охлаждения. В статье приводятся математические закономерности необходимые для вычисления теплового потока при литье термопластов в форму. Далее на основе расчётных данных произведено исследование с применением метода конечных элементов теплопроводности металлополимерной части. Описанная в статье конструкция композитной формообразующей плиты пресс-формы предполагает изготовление профильного канала охлаждения, максимально приближенного к формообразующей части пресс-формы и расположенного в металлополимерной части. На основе проведенного анализа о температурной напряженности металлополимерной части пресс-формы сделаны выводы и рекомендации по конструированию криволинейной выплавляемой закладной пресс-формы, что позволит конструкторам рассчитать оптимальные геометрические параметры системы охлаждения. Проектирование и изготовление конформных каналов охлаждения в металлополимерной части позволит обеспечить более эффективное охлаждение формообразующей части пресс-формы за счёт приближения поверхности каналов охлаждения к поверхности формообразующей пресс-формы, в конечном счёте, повысить стойкость и производительность композитной пресс-формы.

Ключевые слова: пресс-форма, композит, охлаждение, канал, металлополимер, матрица, пуансон, конечно-элементный анализ, теплопроводность.

Введение. Литьё термопластичных полимеров в металлические пресс-формы является наиболее распространённой технологией получения пластиковых изделий. Металлические пресс-формы обладают высокой стойкостью, до 1 миллиона циклов, высоким качеством формообразующей поверхности. Эти характеристики делают металлические пресс-формы наиболее конкурентными по сравнению с другими технологиями получения пластиковых изделий, такими как аддитивное производство, литьё в силиконовые пресс-формы, литьё в композитные металл-металлополимерные пресс-формы.

В докладах об аддитивном производстве [1, 2] указывается, что аддитивное производство (additive manufacturing AM) занимает объём рынка более 4 миллиардов долларов с прогнозом на устойчивый рост. В области исследований AM при производстве металлических пресс-форм особое внимание уделяется технологиям селективной лазерной плавке (selective laser melting SLM). Так, Newman и другие представили новую концепцию планирования производственных процессов для аддитивного и субтрактивного производства [3]. Исследование показывает, что

на сегодняшний день использование AM при изготовлении готовых деталей функционального назначения ещё невозможно без постобработки, в том числе с применением субтрактивных технологий. Thompson и другие также указали на возможные тенденции использования AM с учётом применения современных полимерных материалов при изготовлении композитных конструкций деталей [1, 4, 5]. Одним из потенциальных направлений использования AM является создание пресс-форм для литья пластмасс под давлением [6, 7]. Преимущества, которые при этом позволяет достичь технология AM, это изготовление конформных каналов охлаждения с использованием технологии SLM. Это приводит к увеличению производительности пресс-формы, так как при этом повышается эффективность охлаждения, а, следовательно, и цикл времени формования [8, 9].

При изготовлении композитных формообразующих деталей пресс-форм, состоящих из металлической обоймы и металлополимерной формообразующей части, AM используются для изготовления мастер-модели, по которой делается негативный отпечаток в металлополимерной части пресс-формы [10, 11]. Схема композитной

пресс формы и входящие в неё части показаны на рис. 1.

Композитная пресс-форма, показанная на рисунке 1, состоит из матрицы 1 и пуансона 2, представляющих собой металлические плиты 3 и 4 с внутренними полостями 5, выпорами 6, отверстиями 7, например, резьбовыми, выполненными

на боковых стенках. В отверстиях 7 размещены соединительные элементы 8, например, штуцеры, связанные с системой охлаждения посредством трубопроводов. В металлической плите 3 матрицы 1 выполнено отверстие 9 под литниковую втулку 10.

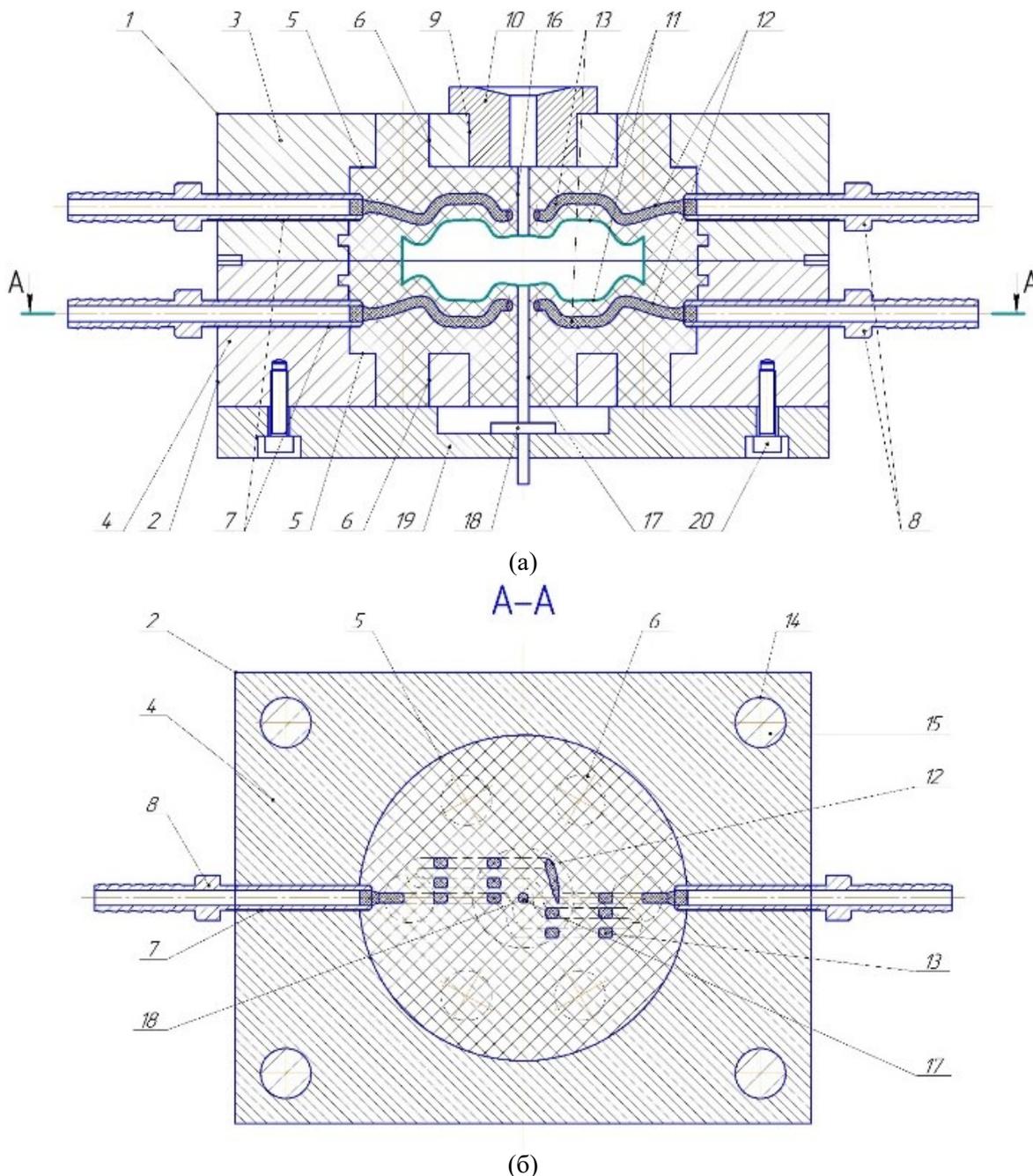


Рис. 1. Схема композитной пресс-формы, продольный разрез (а), схема композитной пресс-формы, разрез А-А (б)

Внутренние полости 5 матрицы 1 и пуансона 2 заполнены металлополимером с образованием формообразующих поверхностей 11 путем отпечатка модели изделия (на рисунке не показана) в жидком металлополимере. При этом в металлополимере матрицы 1 и пуансона 2 выполнены каналы охлаждения 12, которые расположены эквидистантно формообразующим поверхностям

11. Форма поперечного сечения каналов охлаждения 12 может иметь любой профиль, например, окружность. Форма сечения канала охлаждения 12 и его профиль обеспечиваются путем размещения в металлополимере закладных деталей 13, имеющих необходимую форму сечения и профиль, а затем их выплавления. Закладная деталь 13 предварительно получается путем печати

на 3D принтере из материала имеющего температуру плавления от 45 до 60 °С, например, воск или парафин.

В металлических плитах 3 и 4 предусмотрены отверстия 14 под направляющие колонки 15. В металлополимерной части матрицы 1 выполнен литьевой канал 16. В металлополимерной части пуансона 2 выполнено отверстие 17, в которое установлен выталкиватель 18, хвостовик

которого, в свою очередь, установлен с возможностью перемещения в плиту выталкивателя 19. Плита выталкивателя 19 соединена при помощи крепежных элементов 20 с пуансоном 2.

Для более наглядного понимания конструкции, на рисунке 2 показана 3D модель композитной полуформы (матрица или пуансон).

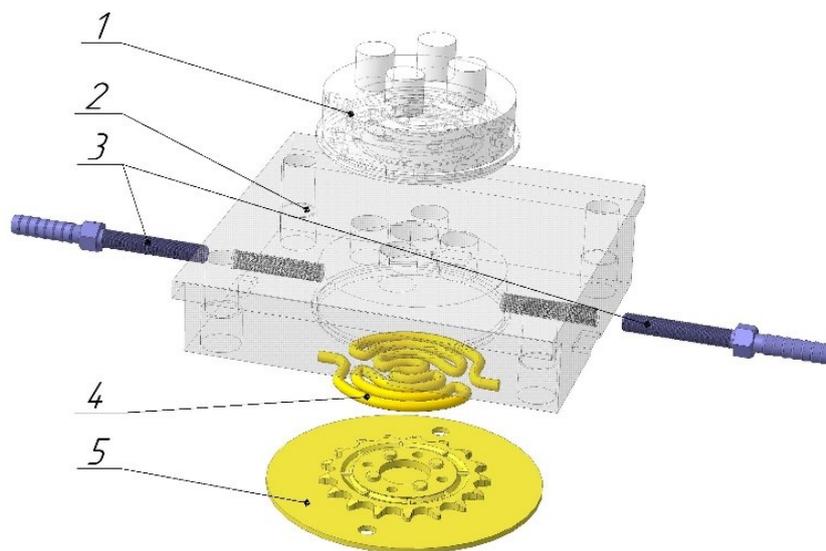


Рис. 2. Разнесённая 3D модель композитной формообразующей плиты пресс-формы.
1 – металлополимерная часть; 2 – металлическая обойма; 3 – штуцеры; 4 – выплавляемая закладная; 5 – мастер-модель

Закономерно, что чем ближе стенки каналов охлаждения к формообразующей поверхности, тем лучше обеспечивается отвод тепла от формообразующей поверхности и, тем меньше требуется времени на технологический цикл формования детали. Кроме того повышение эффективности охлаждения формообразующей детали увеличивает и стойкость металлополимерной части формообразующей.

Материалы и методы. Для расчётов параметров системы каналов охлаждения пресс-формы используется методика, предложенная А.П. Пантелеевым [12, 13]. Далее приведены выражения для расчёта системы термостатирования.

Цикл формования состоит из этапов смыкания пресс-формы, впрыска, выдержки под давлением, охлаждения, размыкания пресс-формы, выталкивания изделия из пресс-формы, технологической обработки формообразующей поверхности. Для дальнейших расчётов необходимо рассчитать время цикла формования, для этого используется следующая зависимость:

$$\tau_c = \tau_{cool} + \tau_{cp} + \tau_e, \quad (1)$$

где τ_{cool} – время охлаждения изделия; τ_{cp} – время смыкания и размыкания формы; τ_e – время выдержки под давлением.

Время охлаждения:

$$\tau_{cool} = \frac{0,405}{a} \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 \left(\ln 1,27 - \ln \frac{t_m - t_f}{t_p - t_f} \right), \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности, m^2/s ; δ – толщина изделия, m ; t_f – средняя за цикл температура формообразующих поверхностей, °С; t_p – начальная температура изделий, равная температуре впрыскиваемого в форму расплава, °С; t_m – температура в середине стенки изделия, при которой раскрывается форма (принимают на 8-25 °С выше температуры t_f).

Количество теплоты Q_0 , поступившей с расплавом и отдаваемой отливкой, Дж:

$$Q_0 = m_0 c_0 (t_p - \bar{t}_m), \quad (3)$$

где m_0 – масса отливки, kg , $m_0 = m_p n + m_g$; m_p – масса изделия, kg ; n – количество гнезд; m_g – масса литников, kg ; c_0 – удельная теплоемкость материала отливки, $Dж/(kg \cdot ^\circ C)$.

\bar{t}_m – средняя (по объему отливки) температура изделия в момент раскрытия формы, °С:

$$\bar{t}_m = t_f + 2(t_p - t_f)/\pi. \quad (4)$$

Количество теплоты, отводимой хладагентом Q_x , можно принять равным Q_0 . Количество

теплоты, потраченное на нагрев окружающей среды и полученной из окружающей среды, в расчётах пренебрежительно мало и им можно пренебречь.

Расход хладагента, кг:

$$g_x = \frac{Q_x}{c_x \Delta t_x}, \quad (5)$$

где c_x – удельная теплоемкость хладагента, Дж/(кг°C) (табличное значение); Δt_x – разность температур на входе и на выходе в канал (принимают не более 2-4 °С для исключения неравномерности охлаждения).

Затраты хладагента или его расход, рассчитывают исходя из площади охлаждаемой поверхности, то есть формообразующей поверхности пресс-формы.

Поперечная площадь сечения канала охлаждения находится как:

$$f_m^{p(m)} = \frac{g_x^{p(m)}}{\rho_x \tau_c \omega}, \quad (6)$$

где ρ_x – плотность хладагента, кг/м³; τ_c – время цикла (1), с; ω – скорость течения хладагента, м/с (принимают $\omega = 0,5 \dots 1,0$ м/с).

Диаметр канала или длина стороны сечения (если канал прямоугольный), м:

$$d_c^{p(m)} = 1,13 \sqrt{f_m^{p(m)}}. \quad (7)$$

Длина каналов охлаждения рассчитывается из условия, что эффективная площадь поверхности каналов должна быть не менее охлаждаемой площади оформляющих поверхностей пуансона и матрицы:

$$F_c^{p(m)} \geq F_{p(m)},$$

где $F_c^{p(m)}$ – площадь поверхности охлаждающих каналов пуансона (матрицы), м².

Суммарная длина каналов круглого сечения, м:

$$l_c^{p(m)} \geq \frac{F_{p(m)}}{\pi d_c^{p(m)}}. \quad (8)$$

Для проведения математических расчётов было использовано программное обеспечение SMATH Studio. Для конечно-элементного моделирования с целью расчёта параметров теплопереноса был использован программный продукт Elcut 6.1. В качестве экспериментальной модели изделия использовалась деталь шестерня.

Основная часть. По приведенным формулам 1-8, а также с использованием табличных данных [12], были получены расчётные значения параметров охлаждения композитной пресс-формы, представленные в таблице 1.

На рисунке 3 показана диаграмма температурных полей моделирования нагрева металлополимерной части выполненной из металлополимера LEO [14, 15]. Размер сечения от формообразующей поверхности до стенки канала охлаждения в принятой модели равняется 8 мм.

Используя различные геометрические модели с различными толщинами сечения металлополимера, между формообразующей поверхностью, нагреваемой расплавом и стенкой канала охлаждения, охлаждаемой хладагентом, были получены результаты, представленные в таблице 2 и на рис. 4.

Таблица 1

Расчётные параметры системы охлаждения композитной пресс-формы

Название параметра, размерность	Обозначение	Значение
Время охлаждения, с	τ_{cool}	450
Время формования 1 шт., с	τ_c	475
Температура изделия, °С	\bar{t}_m	124
Масса отливки, кг	m_0	$3.8706 \cdot 10^{-8}$
Количество теплоты поступившей в форму, Дж	Q_0	$8.6101 \cdot 10^{-9}$
Тепловой поток в единицу времени, Дж/м ²	q	$5.591 \cdot 10^{-7}$
Тепловой поток за цикл, Вт·с/м ²	qc	0.0003
Тепловой поток за 106 циклов, Вт·с/м ²	qs	265.8634
Количество теплоты, отводимой хладагентом, Дж	Q_x	$8.6101 \cdot 10^{-9}$
Расход хладагента, кг	g_x	$2.0598 \cdot 10^{-6}$
Площадь поперечного сечения каналов пуансона и матрицы, м ²	$f_c^p = f_c^m$	$4.3318 \cdot 10^{-6}$
Диаметр канала пуансона и матрицы, м	$d_c^p = d_c^m$	0.0024
Суммарная длина каналов круглого сечения пуансона и матрицы, м	$l_c^p = l_c^m$	1.0422

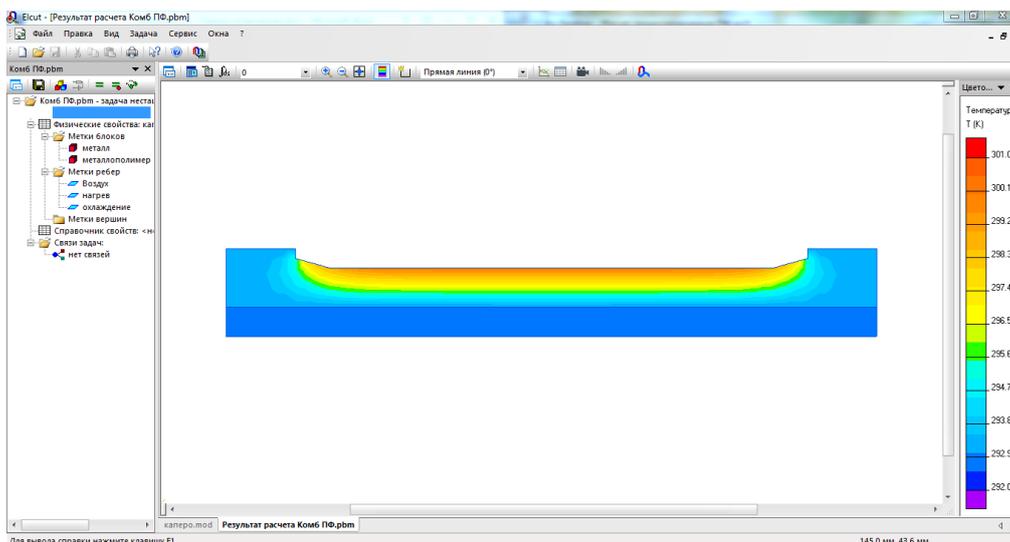


Рис. 3. Диаграмма температурных полей композитной формообразующей детали пресс-формы.

Таблица 2

Расчётные значения температуры нагрева металлополимерной части пресс-формы

Толщина металлополимера, мм	Температура формообразующей, К
2	296
4	297
6	299
8	301

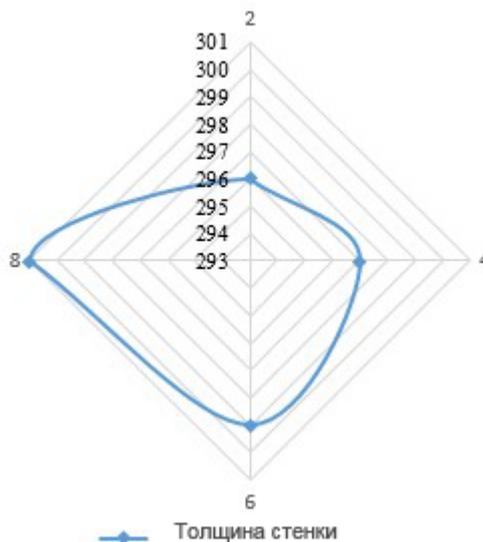


Рис. 4. Зависимость, температуры поверхности металлополимерной формообразующей от толщины стенки до поверхности канала охлаждения

По рисунку 4 объективно видно, что снижение толщины сечения стенки металлополимерной части пресс-формы, отделяющей формообразующую поверхность от стенки каналов охлаждения, существенно снижает температуру формообразующей. Полученная зависимость имеет практически линейный характер. Это свидетельствует, что для обеспечения эффективного охлаждения композитной пресс-формы следует выполнять каналы охлаждения не в металлической части пресс-формы, как это принято при проектировании стандартных пресс-форм, а в металло-

полимерной части. Ещё более эффективным, будет изготовление каналов охлаждения эквидистантной формы, то есть повторяющих контур самой детали.

Выводы. Ряд экспериментов, задачей которых было изготовление профильных каналов охлаждения в металлополимерной части композитной пресс-формы, показал, что эта задача ещё не решена технически. Для того чтобы изготавливать как сами закладные из выплавляемых материалов, так и обеспечить требуемое позиционирование в металлической обойме, требуются

дополнительные изыскания в области машиностроения. Требуется разработка соответствующей технологии получения профильных каналов охлаждения.

Тем не менее, результаты исследования, приведенные в этой работе показали, что диаметр требуемого сечения круглого профиля канала охлаждения для изделия шестерня, должен быть равен 2.4 мм, при этом длина канала охлаждения должна быть 1.04 м.

Варьируя диаметр канала охлаждения, за счёт изменения диаметра сечения закладной детали, можно добиться того, что длина канала охлаждения будет сокращена. Необходимо стремиться к тому, чтобы отношение диаметра канала охлаждения к его длине были оптимальными. Критерии оптимальности в этом случае это эффективность охлаждения, то есть максимальный теплообмен. Но в этой системе оптимизации будут и ограничения по диаметру канала охлаждения, и его длине. Это связано с тем, что слишком тонкая закладная деталь из воска будет очень хрупкой. Отсутствие жесткости такой детали приведет к сложностям монтажа этой детали перед заливкой в обойму металлополимера. Длина каналов охлаждения ограничена также, так как зависит от площади формообразующей поверхности и её невозможно устанавливать по своему усмотрению.

В целом, сосредоточенные в этой статье расчётные приёмы и выражения, позволяют произвести предварительный расчёт требуемых параметров каналов охлаждения, сечение и длину. Далее, уже на основе формы и геометрии самой детали или формообразующей её поверхности композитной пресс-формы, можно спроектировать модель закладной детали из выплавляемого материала. Используя аддитивное производство, не составит труда изготовить такую закладную деталь и использовать её для получения профильного канала охлаждения.

При этом будет обеспечена максимальная стойкость и производительность композитной металл-металлополимерной пресс-формы.

Финансирование. Данное исследование финансировалось за счет гранта Президента Российской Федерации, грант № МК-4006.2021.4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Thompson M. K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B., Martina F.. Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considera-

tions, and Constraints // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2016. Vol. 65. Pp. 737–760. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.

2. Романович А.А. Энергосбережение при производстве строительных изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №3. С. 69-71.

3. Newman S. T., Zhu Z., Dhokia V., Shokrani A.. Process Planning for Additive and Subtractive Manufacturing Technologies // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2015. Vol. 64. Pp. 467–470. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.109>.

4. Lubimyi N.S., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Antsiferov S.I., Chetverikov B.S., Ryazantsev V.G., Brazhnik J., Ridvanov I. Justification of the Use of Composite Metal-Metal-Polymer Parts for Functional Structures // Polymers. 2022. Vol. 14. Iss. 352. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym14020352>

5. Chetverikov B. S., Annenko D. M., Lubimyi N. S., Tikhonov A. A. Substantiation of the Type of Machining of a Flat Metal-Metal-Polymer Surface Considering the Provision of the Required Roughness of the Part // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham, 2021. Vol. 160. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_5

6. Першин Н.С., Чепчуров М.С. Использование металлополимеров в пресс-формах для литья пластмасс // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. № 4. С. 86–90.

7. Першин Н.С., Чепчуров М.С. Изготовление формообразующих деталей персс-форм из композиционных материалов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. №6. С. 76–81

8. Jahan S. A., Hazim E. M. Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding // Procedia Manufacturing. 2016. Vol. 5. Pp. 888–900 <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.076>

9. Wang Y., Yu K. M., Wang C. C. L. Spiral and Conformal Cooling in Plastic Injection Molding // CAD Computer Aided Design 2016. Vol. 63. Pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.11.012>.

10. 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. doi:10.1080/14484846.2020.1786654

11. Lubimyi N. S., RF Patent No. 188720. Metal-metal-polymer mold. publ. 04/22/2019. Bull. No. 12.

12. Panteleev A. P., Shevcov U. M., Goryachev I. A. Plastic Recycling Tooling Revamping Guide // Moscow: mechanical engineering, 1986. 399 p.

13. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds // UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.

14. Металлополимеры LEO [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leopolimer.ru/index.htm> (дата обращения: 16.03.2022)

15. Romanovich A. A., Ebrahim A., Romanovich M. A. Improving the efficiency of the material grinding process // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945. 012060.

Информация об авторах

Любимый Николай Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Польшин Андрей Александрович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: info@polshin.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Лозовая Светлана Юрьевна, доктор технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Тихонов Александр Андреевич, магистрант. E-mail: cherep2240@ Rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, 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, Костюкова, д. 46.

Лямина Светлана Андреевна, студент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: beardestroyer7@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Голубева Ника Денисовна, студент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: beardestroyer7@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, Костюкова, д. 46.

Поступила 16.03.2022 г.

© Любимый Н.С., Польшин А.А., Лозовая С.Ю., Тихонов А.А., Герасимов М.Д., Лямина С.А., Голубева Н.Д., 2022

***Lubimyi N.S., Polshin A.A., Lozovaya S.Yu., Tikhonov A.A., Gerasimov M.D.,
Lyamina S.A., ¹Golubeva N.D.**

Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: nslubim@bk.ru

INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF CONFORMAL COOLING CHANNELS OF COMPOSITE MOLDS

Abstract. The article deals with the issue of evaluating the performance of a composite metal-metal-polymer mold. The use of a composite mold, including a forming plate consisting of a metal, and a metal polymer introduced with a low cooling efficiency of such a mold. For this reason, it is important to develop technological solutions that ensure the efficient operation of the cooling system. The article provides mathematical calculations of the required amount of heat flow when molding thermoplastics into a mold. Further, based on the calculated data, a study is made using finite elements of the thermal conductivity of the metal-polymer part. The design of the composite forming plate of the mold described in the article involves the manufacture of a cooling channel profile as close as possible to the forming part of the mold and located in the metal-polymer part. Based on the analysis of the temperature viscosity of the metal-polymer part of the mold, conclusions and recommendations are given for the design of a curved investment mold. It allows designers to calculate the optimal geometric parameters of the cooling system. The design and manufacture of conformal cooling stages in the metal-polymer part is likely to be preferable for cooling the forming part of the mold by bringing the

cooling reversal surface closer to the surface of the forming mold, resulting in increased durability and productivity of the composite mold.

Keywords: mold, composite, cooling, channel, metal polymer, matrix, punch, finite element analysis, thermal conductivity.

REFERENCES

1. Thompson M.K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B., Martina F.. Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations, and Constraints. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 65. Pp. 737–760. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
2. Romanovich A.A. Energy saving in the production of building products [Energoberezhenie pri proizvodstve stroitel'nyh izdelij]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2011. No.3. Pp. 69-71. (rus)
3. Newman S.T., Zhu Z., Dhokia V., Shokrani A. Process Planning for Additive and Subtractive Manufacturing Technologies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 64. Pp. 467–470. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.109>.
4. Lubimyi N.S., Polshin A.A., Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Antsiferov S.I., Chetverikov B.S., Ryazantsev V.G., Brazhnik J., Ridvanov I. Justification of the Use of Composite Metal-Metal-Polymer Parts for Functional Structures. *Polymers*. 2022. Vol. 14. Iss. 352. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym14020352>
5. Chetverikov B.S., Annenko D.M., Lubimyi N.S., Tikhonov A.A. Substantiation of the Type of Machining of a Flat Metal-Metal-Polymer Surface Considering the Provision of the Required Roughness of the Part. *Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham. 2021. Vol. 160. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_5
6. Pershin N.S., Chepchurov M.S. The use of metal polymers in plastic injection molds [Ispol'zovanie metalopolimerov v press-formah dlya lit'ya plastmass]. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy*. 2015. No. 4. P. 86-90. (rus)
7. Pershin N.S., Chepchurov M.S. Production of shaping parts of molds from composite materials [Izgotovlenie formoobrazuyushchih detalej press-form iz kompozicionnyh materialov]. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road Academy*. 2015. No. 6. Pp. 76–81. (rus)
8. Jahan S.A., Hazim E. M. Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding. *Procedia Manufacturing*. 2016. Vol. 5. Pp. 888–900. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.076>
9. Wang Y., Yu K. M., Wang C.C.L. Spiral and Conformal Cooling in Plastic Injection Molding. *CAD Computer Aided Design*. 2016. Vol. 63. Pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.11.012>.
10. 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. doi:10.1080/14484846.2020.1786654
11. Lubimyi N.S., Metal-metal-polymer mold. Patent RF, no. 188720, 2019.
12. Panteleev A.P., Shevcov U.M., Goryachev I. A. Plastic Recycling Tooling Revamping Guide [Rukovodstvo po modernizacii instrumentov dlya pererabotki plastmass]. Moscow: mechanical engineering. 1986. 399 p. (rus)
13. Liang J., Narahara H., Koresawa H., Suzuki H. Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds. *UK: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 75. Pp. 1751–1761.
14. Metal polymers LEO [Metallopolimery LEO]. URL: <http://www.leopolimer.ru/index.htm> (date of treatment: 16.03.2022)
15. Romanovich A.A., Ebrahim A., Romanovich M.A. Improving the efficiency of the material grinding process. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. 012060.

Information about the authors

Lubimyi, Nikolai S. PhD, Associate Professor. Machines. E-mail: nslubim@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

Polshin, Andrey A. Postgraduate student. E-mail: info@polshin.ru. Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Lozovaya, Svetlana Yu. DSc, Associate Professor. E-mail: nslubim@bk.ru. Belgorod State Technological University named V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Tikhonov, Aleksandr A. Master's student. E-mail: cherep2240@rambler.ru. Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Gerasimov, Mihail D. PhD, Associate Professor of the chair of Hoisting-and-Transport and Road Machines. E-mail: mail_mihail@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, ul. Kostyukova, 46.

Lyamina, Svetlana A. Student. E-mail: beardestroyer7@gmail.com. Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Golubeva, Nika D. Student. E-mail: golubevanika1@gmail.com. Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Received 16.03.2022

Для цитирования:

Любимый Н.С., Польшин А.А., Лозовая С.Ю., Тихонов А.А., Герасимов М.Д., Лямина С.А., Голубева Н.Д. Исследование эффективности работы конформных каналов охлаждения композитных пресс-форм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 101–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-101-109

For citation:

Lubimyi N.S., Polshin A.A., Lozovaya S.Yu., Tikhonov A.A., Gerasimov M.D., Lyamina S.A., Golubeva N.D. Investigation of the efficiency of conformal cooling channels of composite molds. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 101–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-101-109

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116

Богданов В.С., *Анциферов С.И., Богданов Д.В., Сычев Е.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: anciferov.sergey@gmail.com

СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Аннотация. Выполнен анализ состояния и направления развития техники и технологии измельчения материалов в цементной промышленности РФ и за рубежом. Рассмотрено оборудование, используемое для измельчения, к которому относятся шаровые барабанные мельницы, вертикальные мельницы и пресс-валковые измельчители. Показана эффективность использования шаровых барабанных мельниц и их преимущество перед другими помольными агрегатами, используемыми в крупнотоннажном производстве. Определено одно из основных направлений развития эффективности процесса измельчения в шаровых барабанных мельницах, заключающееся в разработке внутримельничных устройств, которые направлены на разрушение застойных зон в загрузке, интенсификацию работы мелющих тел и создание условий внутри мельничной классификации измельчаемого материала. Описана конструкция и принцип действия шаровой барабанной мельницы, оснащенной наклонной межкамерной перегородкой, за счет которой обеспечивается поперечно-продольное движение мелющих тел в корпусе мельницы. Приведены преимущества использования наклонной межкамерной перегородки, к которым относятся снижение массы загрузки мельницы и гидравлического сопротивления перегородки, улучшение аспирации, уменьшение потребляемой мощности и обеспечение поперечно-продольного движения.

Ключевые слова: помольный агрегат, шаровая барабанная мельница, измельчение, мелющие тела, удельный расход энергии, межкамерная перегородка, цемент.

Введение. В горнорудной, химической, энергетической и строительной промышленности измельчению подвергаются сотни миллионов тонн горных пород. При этом тонкость помола готового продукта составляет менее 40 мкм. В настоящее время производство цемента в РФ составляет более 65 млн. тонн в год [1]. По существующей технологии перерабатываемый материал измельчению подвергается дважды – на стадии подготовки сырья и при помоле клинкера с добавками [2, 3]. Процесс помола для производства одной тонны цемента потребляет порядка 70 % всей мощности [4]. В промышленности строительных материалов РФ на измельчение расходуется более 2 триллионов кВт·ч электроэнергии.

Используемые для тонкого помола в крупнотоннажном производстве агрегаты (мельницы) обладают весьма низким КПД, который по мнению специалистов, занимающихся проблемами совершенствования техники и технологии измельчения, не превышает 5 % [4, 5].

Методика. Какие мельницы в настоящее время в мировой практике получили наибольшее распространение в цементной промышленности. Доля шаровых барабанных мельниц составляет около 59 %, вертикальные мельницы – 25 %, пресс-валковые измельчители при комбинированной схеме применения совместно с шаровыми барабанными мельницами – 13 %. Доля горизонтальных мельниц составляет около 3 % [2].

Следует обратить внимание на тот факт, что получившие в последние годы широкое распространение вертикальные мельницы преимущественно применяются для помола сырьевых материалов [2].

Независимо от конструкции мельниц в них заложен один и тот же принцип измельчения – посредством рабочего органа создать в частице измельчаемого материала нагрузки, которые превышают силы межмолекулярного сцепления, в результате чего частица разрушается как минимум на две части. Такими нагрузками, реализуемыми в выше названных мельницах, являются: удар, раздавливание, истирание, которые в зависимости от конструкции мельниц могут наблюдаться в различном процентном соотношении. Например, в шаровых барабанных мельницах наблюдаются все виды нагрузок – удар, раздавливание и истирание. В вертикальных, пресс-валковых и горизонтальных мельницах используется принцип нагружения сжатием (давлением). Очевидно то, что чем выше напряжение сжатия, тем выше эффективность процесса измельчения материала, тем больше энергозатраты и наоборот – чем меньше давление сжатия, тем меньше затрачивается энергии на осуществление процесса измельчения. В пресс-валковых измельчителях давление в слое материала составляет 250-300 МПа, в горизонтальных и вертикальных до 50 МПа.

При выборе помольного агрегата для производства цемента учитывают не только величину

удельного расхода энергии, эксплуатационные расходы, капвложения, но и самое главное – потребительское качество готового продукта. Цемент, получаемый в шаровых барабанных мельницах, обладает широким спектром размера частиц в отличие от цемента, получаемого в вертикальных и горизонтальных мельницах, имеющего узкую характеристику распределения размеров частиц. При равном средневзвешенном размере частиц цемент, полученный в шаровых барабанных мельницах, обладает меньшей водопотребностью, чем цемент, полученный в вертикальных мельницах, он более технологичен при изготовлении растворов, бетона и железобетона. Пресс-валковые измельчители практически не применяют как самостоятельный помольный агрегат в производстве цемента из-за узкого гранулометрического распределения готового цемента [2, 6].

С целью оптимизации процесса измельчения в шаровых барабанных мельницах получила распространение двухстадийная схема измельчения. На первой стадии шихта измельчается в пресс-валках до размера – 5 мм, подается в сепаратор, где выделяются частицы готового продукта размером – 80 мкм, а крупка направляется в шаровую барабанную мельницу для финишного помола. По такой схеме удельный расход энергии снижается до 30 %, а полученный цемент отличается высокими потребительскими свойствами.

Основная часть. Анализ рынка оборудования для помола цемента позволяет сделать вывод о том, что к настоящему времени основным помольным агрегатом является шаровая барабанная мельница, работающая в замкнутом цикле измельчения с сепаратором, а в качестве предизмельчителя используются пресс-валки [2, 6–9].

Во всех известных к настоящему времени конструкциях мельниц используется принцип создания напряжения в частице измельчаемого материала, величина которого должна превышать предел прочности материала на сжатие в таком случае, произойдет разрушение частицы. При этом, если частицы имеют размер менее 100 мкм в них уже практически отсутствуют дефекты структуры и для их разрушения требуется многократное избыточное приложение нагрузки на что расходуется значительная дополнительная энергия. Нами установлено, что частицы клинкера размером менее 0,5 мм практически не измельчаются ударом, происходит обратный процесс – наклеп, частицы укрупняются, поэтому в данном случае измельчение необходимо осуществлять раздавливанием и истиранием. Установлено, что с увеличением подводимой энергии к измельчаемым частицам происходит не только уменьшение размера частиц, но и аккумулируется частицами

некоторая часть избыточной энергии, что значительно улучшает реакционную активность цемента [10]. Это подтверждается тем, что прочность цементного камня, приготовленного из «свежего» цемента в течение часа после помола и цемента после 10 суточного хранения на 10–15 % выше.

В шестидесятые годы это свойство «свежемолотого» цемента было использовано на многих промышленных предприятиях. Были централизовано установлены вибрационные мельницы, в которых осуществлялся домол низкомарочного цемента до требуемой кондиции. В данном случае использовался не только эффект от увеличения удельной поверхности цемента, но и эффект от аккумуляции частицами цемента избыточной энергии.

Анализ рынка оборудования для помола цемента не позволяет однозначно ответить на вопрос, какой тип мельниц экономически целесообразен, кому отдать предпочтение. Каждый производитель рекламирует только свою продукцию, показывая ее преимущество и умалчивая о недостатках. Однако рынок делает свой выбор и отдает предпочтение тем конструкциям мельниц, которые обеспечивают более качественный и востребованный цемент, чтобы не возникали проблемы с его реализацией. Такими мельницами в настоящее время и в обозримом будущем, пока не будут изобретены новые способы измельчения, останутся шаровые барабанные мельницы [11].

Несмотря на то, что шаровая барабанная мельница изобретена более 125 лет назад датским инженером М. Девидсоном, она не претерпела за эти годы никаких существенных изменений и представляет собой полый барабан, заполненный мелющими телами. Все последующие годы были направлены на повышение эксплуатационной надежности мельницы в целом, совершенствование режима процесса измельчения, совершенствование привода, применение двухстадийного и замкнутого циклов помола, оптимизации геометрических параметров барабана мельницы [2, 4, 5].

К настоящему времени установлено, что экономически целесообразными являются такие геометрические параметры барабана мельницы – диаметр 4,6 м, длина 16 м [12]. При увеличении диаметра шаровой барабанной мельницы возникают проблемы с износом и креплением футеровки внутренней поверхности барабана, эксплуатационной надежностью межкамерной перегородки и выходной решетки [12].

Существенным недостатком шаровых барабанных мельниц, который не устранен до настоящего времени, является следующий. Барабан

мельницы вращается с частотой равной 0,76 от критической частоты, при которой мелющие тела начинают центрифугировать, не совершая работы измельчения. Мелющие тела внутри барабана мельницы перемещаются в первой камере в водопадном режиме, осуществляя измельчение материала ударом, а во второй в каскадном измельчая материал раздавливанием и истиранием [2, 4, 5]. В процессе измельчения участвует только 50–55 % мелющих тел, перемещающихся в поперечном сечении барабана мельницы, в свою очередь остальные 45–50 % образуют застойную зону в центральной части загрузки, препятствуя перемещению частиц измельчаемого материала к выгрузке в продольном сечении [2, 4, 5].

Согласно диаграмме помола порядка 50 % частиц размером 80 мкм и менее, удовлетворяющих требованиям готового продукта, находятся в первой камере измельчения. Наличие таких частиц в камере помола снижает эффективность процесса измельчения, за счет демпфирования взаимодействия между мелющими телами и частицами измельчаемого материала. Зачастую это приводит к их переизмельчению и агломерации переизмельченных частиц, что подтверждается диаграммами помола. Налипание переизмельченных частиц цемента на мелющие тела или футеровку слоем толщиной 200 мкм снижает производительность помольного агрегата на 50 %.

Таким образом, одним из направлений повышения эффективности процесса измельчения в шаровых барабанных мельницах является отбор частиц готового продукта внутри барабана мельницы и их байпасирование по ходу процесса измельчения. Это не только повысит эффективность процесса измельчения, но и снизит удельный расход энергии [13].

В соответствии с теорией Девиса о двухфазном режиме движения мелющих тел в барабанной мельнице, согласно которой до точки отрыва шар движется по круговой траектории вместе с барабаном мельницы, а затем в точке отрыва он переходит на параболическую траекторию свободного падения, ударяя по частицам измельчаемого материала в зоне падения. В точке отрыва шар обладает максимальной энергией равной сумме кинетической и потенциальной энергий. Потенциальная энергия равна произведению массы шара на высоту его подъёма, то есть она зависит от диаметра барабана мельницы. Кинетическая энергия шара равна произведению массы шара на квадрат скорости его движения, то есть зависит от частоты вращения барабана мельницы. Имея конструктивные ограничения по диа-

метру барабана мельницы и частоте его вращения, мы не имеем возможности существенным образом увеличить суммарную энергию шара. Следовательно, одним из направлений совершенствования эффективности процесса измельчения в шаровых барабанных мельницах является создание таких внутримельничных устройств, которые не только бы обеспечивали разрушение застойных зон в загрузке, интенсифицировали работу мелющих тел, но и создавали условия внутримельничной классификации измельчаемого материала.

Нами, впервые в мировой практике, разработана шаровая барабанная мельница с поперечно-продольным движением мелющих тел, проведены всесторонние лабораторные и промышленные исследования на различных типоразмерах шаровых барабанных мельниц [14, 15].

На рисунке 1 представлена принципиальная схема шаровой барабанной мельницы, оснащенной наклонной межкамерной перегородкой.

Наклонная межкамерная перегородка 4 устанавливается под углом α к горизонтальной оси барабана 2 мельницы. Камера 3 грубого помола имеет в исходном положении (а) минимальную длину, равную L . Мелющие тела 8 в ней занимают положение, изображенное на схеме, то есть находятся на максимальном уровне. Камера 5 тонкого помола имеет максимальную длину равную L . Мелющие тела 9 в ней располагаются на минимальном уровне, изображенном на рисунке 1а. Их плоскость располагается под углом β , который равен углу естественного откоса мелющих тел 9, находящихся в камере 5 тонкого помола.

При вращении барабана 2 мельницы через половину оборота он займет характерное положение (б), изображенное на рисунке 1б. При этом длина камеры 3 грубого помола увеличится на величину ΔL , равную $\Delta L = \frac{D}{tg\alpha}$, и станет максимальной, равной $L_1 + \Delta L$. Мелющие тела 8 в камере 3 грубого помола переместятся вдоль оси барабана мельницы в свободное пространство под наклонную межкамерную перегородку 4, их верхняя плоскость установится под углом β к горизонтальной оси барабана мельницы, равном углу естественного откоса мелющих тел, находящихся в камере 3 грубого помола. Мелющие тела 8, кроме обычного движения в поперечном сечении барабана мельницы, совершат дополнительное продольное движение под наклонную межкамерную перегородку 4. В связи с этим разрушаются застойные зоны в центральной части загрузки, и совершается дополнительная работа измельчения. Кроме этого, происходит процесс внутримельничной классификации измельчаемого материала – под наклонную межкамерную

перегородку вместе с мелющими телами перемещаются самые мелкие частицы измельчаемого

материала, которые направляются дальше по ходу процесса измельчения во вторую камеру 5.

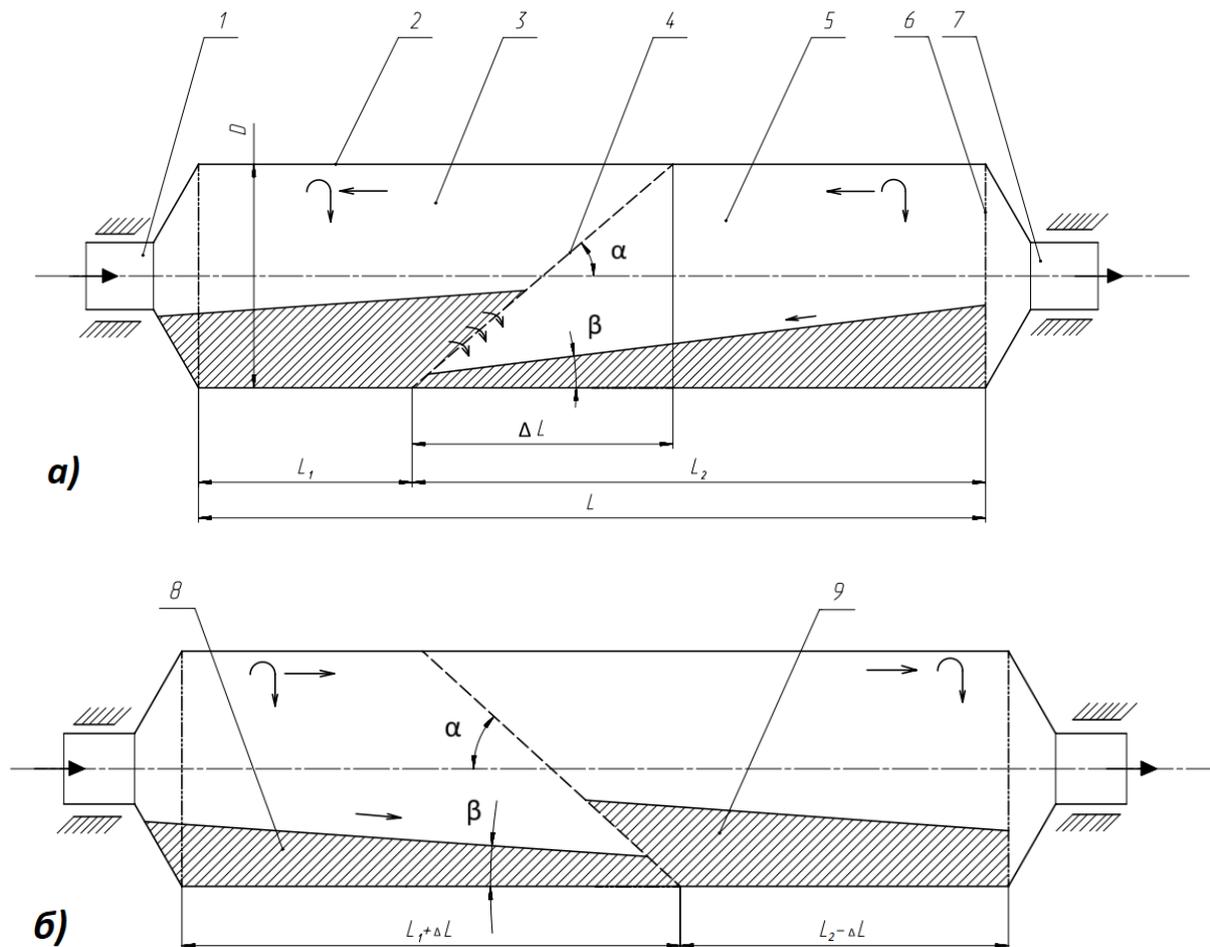


Рис. 1. Схема работы шаровой барабанной мельницы с наклонной межкамерной перегородкой: 1, 7 – загрузочная и разгрузочная цапфа; 2 – корпус; 3 – камера грубого помола; 4 – наклонная межкамерная перегородка; 5 – камера тонкого помола; 6 – выходная решётка; 8, 9 – мелющие тела

Длина камеры 5 тонкого помола станет минимальной, равной $L_2 - \Delta L$. Ее длина уменьшится на ΔL . Мелющие тела 9 переместятся в сторону разгрузочной решетки 6 и займут максимальный уровень. Здесь также совершится дополнительное продольное движение, разрушатся застойные зоны в центральной части загрузки, и произведется дополнительная работа измельчения интенсивным истиранием. Затем цикл повторится.

При переходе из положения (б) в положение (а) мелющие тела 8 вместе с измельчаемым материалом, находящиеся под наклонной межкамерной перегородкой 4 в камере 3 грубого помола, «зачерпываются» ею при дальнейшем вращении барабана, они скатываются в направлении загрузочной цапфы 1.

Происходит внутримельничная классификация измельчаемого материала – мелкие частицы проходят через щели в перегородке во вторую камеру 5 тонкого помола, а крупные возвращаются в камеру 3 грубого помола на доизмельчение.

Конструкция наклонной перегородки и расположение щелей, выполнены таким образом, чтобы предотвратить обратное просыпание измельчаемого материала из камеры 5 тонкого помола в камеру 3 грубого помола при переходе барабана мельницы из положения (б) в положение (а).

Площадь наклонной межкамерной перегородки 4 при рекомендуемом угле $\alpha = 50^\circ$ ее наклона к продольной оси барабана мельницы на 45 % больше площади обычной вертикальной перегородки. Следовательно, при равном «живом сечении» площадь отверстий в обычной вертикальной перегородке будет меньше, чем суммарная площадь отверстий в наклонной межкамерной перегородке.

Гидравлическое сопротивление перегородки снижается на 20–25 %, что существенным образом улучшает режим процесса аспирации, снижает нагрузку на фильтры.

Промышленные испытания наклонной межкамерной перегородки были проведены на мельницах $2,6 \times 13$ м, 3×14 м, $3,2 \times 15$ м, $4 \times 13,5$ м. Опыт

промышленной эксплуатации показал, что наибольшая эффективность процесса измельчения достигается у мельниц с диаметром барабана 4 м.

Главным фактором, обеспечивающим повышение технико-экономических показателей работы мельниц, является существенное снижение массы мелющих тел. Например, масса мелющих тел в мельнице 4×13,5 м была уменьшена с 238 т до 160 т, то есть на 78 т или на 32 %. Причем масса шаров в камере грубого помола была уменьшена со 100 т до 50 т, то есть на 50 %. Во второй камере со 138 т до 120 т, то есть на 13 %. Это объясняется тем, что во второй камере загружен цельпес, который обладает меньшей продольной подвижностью. Если во вторую камеру загрузить мелкие шары диаметром 20-30 мм возможно получение большего эффекта за счет интенсификации продольного движения мелющих тел во второй камере. Вследствие снижения массы мелющих тел на 32 % потребляемая мощность привода снизилась с 3180 кВт до 2560 кВт, то есть на 620 кВт или на 19,5 %. При той же производительности мельницы за счет снижения потребляемой мощности привода удельный расход энергии снизился с 37,6 до 30,3 кВт·ч/т, то есть на 19,4 %. Экономия электроэнергии при коэффициенте использования равном 0,78 составила около 5 млн. кВт.

При снижении массы мелющих тел снижается нагрузка на опорно-ходовую часть мельницы, на редуктор, на корпус мельницы, на внутримельничные устройства. При движении мелющих тел в обычной мельнице преобладает трение скольжения как между мелющими телами и футеровкой, так и в слоях между мелющими телами, вследствие чего происходит интенсивный износ как шаров, так и футеровки, который суммарно достигает до 1,5 кг на тонну цемента. При применении наклонной перегородки преобладает трение качения, за счет чего снижается удельный расход мелющих тел. За счет уменьшения суммарной массы загрузки так же снижается расход дорогостоящих мелющих тел. Выработка готового продукта на единицу массы мелющих тел возрастает до 60 %.

Режим поперечно-продольного движения мелющих тел так же может быть обеспечен за счет использования наклонных и спирально-винтовых диафрагм, конической футеровки с изменяемым на противоположное направление наклона рабочей поверхности. Однако наибольший эффект обеспечивается при использовании наклонных межкамерных перегородок.

Выводы. Анализ рынка помольного оборудования, применяемого для помола клинкера и добавок, показывает, что в обозримом будущем

шаровая барабанная мельница останется основным помольным агрегатом при крупнотоннажном производстве. Она обладает простой конструкцией, высокой эксплуатационной надежностью, возможностью автоматизации процесса измельчения, позволяет производить цемент с требуемым потребительским качеством. Основные направления ее совершенствования были направлены на повышение эксплуатационной надежности, автоматизацию управления процессом работы, применением различных схем в сочетании с другими агрегатами. Одним из важных факторов, наряду с известными достижениями, является оптимизация работы мелющих тел и внутримельничная классификация измельчаемого материала.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках проекта № 22-29-01438 подержанного Российским научным фондом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bogdanov V.S., Dontsova Y.A., Bogdanov N.E. Mechanics of the grinding media in ball mills with longitudinal and transverse motion of the grinding media // ZKD. 2019. № 6. Pp. 15–24.
2. Хардер Й. Развитие одноэтапных процессов измельчения в цементной промышленности // Цемент Известь Гипс. 2006. № 1. С. 24–38.
3. Николаева Н.В. Выбор и расчет мельниц само- и полусамозмельчения // Записки Горного института, 2007. №1. С. 166–168 с.
4. Ястребов К.Л., Николаев М.Д. Расчет мощности, потребляемой барабанными мельницами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. №4. С. 56–59.
5. Дуда В. Цемент. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
6. Jung O. Raising the Output of Vertical Roller Mills as an Alternative to New Capital Investment // Cement International. 2004. № 2. Pp. 52–57.
7. Harder J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie // ZKG International. 2003. № 3. Pp. 31–42.
8. Jorgensen S.W. Cement grinding – a Comparison between Vertical Roller Mill and Ball Mill // Cement International. 2005. № 2. Pp. 55–63.
9. Чижик Е.Ф., Соколов В.И. Концепция измельчения руд в шаровых барабанных мельницах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 21. С. 326–330.
10. Ястребов К.Л., Дружинина Т.Я., Ершов В.А. Параметры механического и технологического режима работы мельниц, методы и аппаратное оформление исследований // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. №2. С. 56–64.

11. Шутов В.В. Оптимизация параметров барабанных мельниц // Записки горного института, 2004. №1. С. 86-89.

12. Nakajma Y. Wo liegen die Grenzen beim Bau grosse Rohrmulden // ZKG. 1971. № 9. Pp. 420–424.

13. Пат. 2246355, Российская федерация, МКИ В02 С17/06. Трубная мельница с внутримельничным классифицирующим устройством / В.С. Богданов, Ю.М. Фадин и др; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. №2003132214/03; заявл. 03.11.2003; опубл. 20.02.2005, Бюл. №5. 5 с.

14. Авт. свид. 733727 СССР, МКИ В02 С17/06. Шаровая мельница / В.С. Богданов, Б.Д. Тиховидов, Н.С. Богданов; заявитель и патентообладатель Харьковский инженерно-строительный институт. №2549471/29-33; заявл. 02.12.77; опубл. 15.05.80, Бюл. №18. 2 с.

15. Сапожников А.И., Репин С.В., Иванов П.С. Инновационные технологии измельчения строительных материалов // Вестник Тувинского государственного университета. 2014. №3. С. 22–28.

Информация об авторах

Богданов Василий Степанович, доктор технических наук, профессор. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Богданов Денис Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механическое оборудование». E-mail: bogdanov.denis.v@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Сычёв Евгений Андреевич, аспирант кафедры «Механическое оборудование». E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Поступила 11.03.2022 г.

© Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Сычев Е.А., 2022

Bogdanov V.S., *Anciferov S.I., Bogdanov D.V., Sychev E.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

STATE AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF GRINDING TECHNIC AND TECHNOLOGY

Abstract. The analysis of the state and direction of development of equipment and technology for grinding materials in the Russian and foreign cement industry is carried out. The equipment used for grinding with ball mills, vertical mills and press-roll grinders is considered. The effectiveness of the use of ball mills and their advantage over other grinding units used in large-capacity production is shown. One of the main directions for the development of the efficiency of the grinding process in ball drum mills has been determined. It consists in the development of intra-mill devices that are aimed at destroying stagnant zones in the feed, intensifying the work of grinding bodies and creating conditions within the mill classification of the crushed material. The design and principle of operation of a ball drum mill equipped with an inclined inter-chamber partition is described. It ensures the transverse-longitudinal movement of grinding bodies in the mill body. The advantages of using an inclined inter-chamber partition are given, which include a reduction in the weight of the mill load and the hydraulic resistance of partition, improved aspiration, reduced power consumption and provision of transverse-longitudinal movement.

Keywords: grinding unit, ball drum mill, grinding, grinding media, specific energy consumption, inter-chamber partition, cement.

REFERENCES

1. Bogdanov V.S., Dontsova Y.A., Bogdanov N.E. Mechanics of the grinding media in ball mills

with longitudinal and transverse motion of the grinding media. ZKD. 2019. No 6. Pp. 15–24

2. Harder J. Development of one-stage grinding processes in the cement industry [Razvitie odnoetapnykh processov izmel'cheniya v cementnoj promyshlennosti]. Cement Lime Gypsum. 2006. No 1. Pp. 24–38. (rus)
3. Nikolaeva N.V. Selection and calculation of self- and semi-self-grinding mills [Vybor i raschet melnits samo- i polusamoizmelcheniia]. Notes of the Mining Institute. 2007. No. 1. Pp 166–168. (rus)
4. Yastrebov K.L., Nikolaev M.D. Calculation of the power consumed by drum mills [Raschet moshchnosti potreblaemoi barabannymi melnitsami]. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 4. Pp. 56–59. (rus)
5. Duda V. Cement. [Cement]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 464 p. (rus)
6. Jung O. Raising the Output of Vertical Roller Mills as an Alternative to New Capital Investment. Cement International. 2004. No. 2. Pp. 52–57.
7. Harder J. Modern grinding technology in the cement industry. ZKG International. 2003. No.3. Pp. 31–42.
8. Jorgensen S.W. Cement grinding – a Comparison between Vertical Roller Mill and Ball Mill. Cement International. 2005. No. 2. Pp. 55–63.
9. Chizhik E.F., Sokolov V.I. The concept of grinding ores in ball drum mills [Kontseptsii izmelcheniia rud v sharovykh barabannyykh melnitsa]. Mining information and analytical bulletin. 2005. No. Pp. 326–330. (rus)
10. Yastrebov K.L., Druzhinina T.Ya., Ershov V.A. Parameters of the mechanical and technological mode of operation of mills, methods and instrumentation of research. [Parametry mekhanicheskogo i tekhnologicheskogo rezhima raboty melnits metody i apparaturnoe oformlenie issledovaniy]. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 2. Pp. 56–64. (rus)
11. Shutov V.V. Optimization of drum mill parameters [Optimizatsiya parametrov barabannyykh melnits]. Notes of the Mining Institute. 2004. No. 1. Pp. 86–89. (rus)
12. Nakajima Y. What are the limits when building large Rohrmulden. ZKG. 1971. No 9. Pp. 420–424.
13. Bogdanov V.S., Fadin Yu.M. Tube mill with in-mill classifying device. Patent RF, no 2246355, 2005.
14. Bogdanov V.S., Tikhovidov B.D., Bogdanov N.S. Ball mill. Automated date USSR, no 733727, 1980.
15. Sapozhnikov A.I., Repin S.V., Ivanov P.S. Innovative technologies for grinding building materials [Innovatsionnye tekhnologii izmelcheniia stroitelnykh materialov]. Bulletin of Tuva State University. 2014. No. 3. Pp. 22–28. (rus)

Information about the authors

Bogdanov, Vasily S. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Antsiferov, Sergey I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Bogdanov, Denis V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: bogdanov.denis.v@gmail.com. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Sychev, Evgeniy A. Post-graduate student. E-mail: evgeniy.sychov.015@gmail.com. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Received 11.03.2022

Для цитирования:

Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Сычев Е.А. Состояние и направления развития техники и технологии измельчения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 110–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116

For citation:

Bogdanov V.S., Antsiferov S.I., Bogdanov D.V., Sychev E.A. State and directions of development of grinding technic and technology. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 110–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-117-125

Кобыльский Р.Э.

Омский государственный технический университет

E-mail: roman.kobilsky@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЕ УПЛОТНЕНИЕ

Аннотация. В данной научной работе рассмотрена важность ресурса работы цилиндропоршневого уплотнения для поршневых компрессорных агрегатов среднего и высокого давления. Рассмотрена схема сил, действующих на уплотнение (справедливая, как для поршневых колец, так и для манжетных уплотнений), приведены основные расчетные формулы и была предложена перспективная конструкция комбинированного уплотнения для повышения ресурса работы всего компрессорного агрегата, работающего, преимущественно без смазки проточной части цилиндра. Для решения данной проблемы была выдвинута гипотеза о возможности снижения нагрузки на уплотнение путем дросселирования газа, не уменьшая, тем самым, производительность поршневого агрегата. Также в данной работе приведены схемы и фото перспективной конструкции комбинированного уплотнения (четыре варианта комбинирования). Произведено подробное описание экспериментального стенда для определения перепада давления (нагрузки), действующего на манжетное уплотнение, а также описан порядок проведения экспериментального исследования. В результате было получено, что применение комбинированного уплотнения позволяет уменьшить перепад давления на первом уплотнении примерно в два раза, с 2 МПа до 1,1 МПа. Соответственно, ресурс работы уплотнения теоретически увеличивается пропорционально уменьшению перепада давления, так же в два раза.

Ключевые слова: манжетное уплотнение, поршневой компрессор, цилиндропоршневая группа, ресурс уплотнения, эффективность компрессора.

Введение. Поршневые компрессорные агрегаты используются в различных отраслях промышленности. На химических, металлургических, нефтеперерабатывающих и многих других предприятиях, газовые и воздушные поршневые компрессоры составляют значительную часть механического оборудования, от надежности и долговечности которого зависит стабильность технологического процесса, а при работе на взрывоопасных и токсических газах безопасностью обслуживающего персонала. Цилиндропоршневые уплотнения - наиболее ответственные узлы, работа которых влияет на режим и безопасность эксплуатации компрессоров. Учитывая тот факт, что сегодня в нефтеперерабатывающей отрасли практически все воздушные и газовые поршневые компрессоры (как отечественные, так и импортные) во всем диапазоне давлений от низкого до сверхвысокого переведены на работу без смазки проточной части [1], то увеличение ресурса работы цилиндропоршневых уплотнений выходит на первый план. Коэффициент долговечности подобных компрессоров лежит в диапазоне 0,6–0,74 [2]. Проведенный литературный обзор показал, что ресурс работы цилиндропоршневых уплотнений компрессорных агрегатов, работающих без смазки на средних и высоких давлениях, лежит в диапазоне 1000–5500 ч. [3], что не соответствует современным требованиям, предъявляемым к цилиндропоршневым уплотнениям. Согласно требованиям [4] период между ремонтно-восстановительными

работами должен быть минимум 8000 ч. Повышение ресурса работы цилиндропоршневых уплотнений особенно актуально для зарубежных компрессорных агрегатов эксплуатирующихся на территории Российской Федерации. Стоимость комплекта уплотнений может достигать (в зависимости от марки компрессорного агрегата) 2000 \$. Величина импортных агрегатов составляет, примерно 65–70 % от общего количества компрессорных агрегатов, задействованных на территории РФ. Из теории цилиндропоршневого уплотнения известно, что пиковая нагрузка приходится на первое уплотнение (до 60 % на поршневое кольцо [5], до 70–75 % на манжетное уплотнение [6,10]), происходит прихватывание уплотнения к цилиндру, а, следовательно, и быстрый износ. В данном случае, ресурс работы всего компрессорного агрегата будет определяться ресурсом работы первого уплотнения. Нагрузка, действующая на манжетное уплотнение (как и на поршневое кольцо), определяется четырьмя силами, представленными на рисунке 1: осевой силой F_1 , которая «раздавливает» уплотнение о стенку цилиндра, радиальной силой F_2 , которая прижимает уплотнение к зеркалу цилиндра, осевой силой трения F_3 , которая всегда направлена противоположно вектору скорости поршня и силой собственной упругости материала F_4 .

Износ наружной поверхности А в основном зависит от величины силы F_2 , которая определяется разностью сил давления газа, действующих

на поверхность В и С, и рассчитывается по формуле (справедливой только для расчета уплотнений, работающих без смазки) [7]:

$$\Delta P = \frac{\beta(P_1 - P_2)}{2}, \quad (1)$$

где β – коэффициент, учитывающий противодействие на уплотнении, создаваемое рабочей средой со стороны цилиндра:

$$\beta = \frac{1,4k}{\sqrt[3]{h^2}}, \quad (2)$$

где k – экспериментально определяемый коэффициент, учитывающий свойства материала, шероховатость поверхности трения, характер контактирования между цилиндром и уплотнением и режимы работы ступени компрессора (для различного типа графитов $k = 1,0 \div 3,5$; для фторопластовых композиций $k = 2,5 \div 3,5$). Давление газа на внутреннюю поверхность D согласно [1] считают постоянным и равным давлению перед уплотнением. Данный коэффициент был уточнен авторами в работе [6] для манжетных уплотнений.

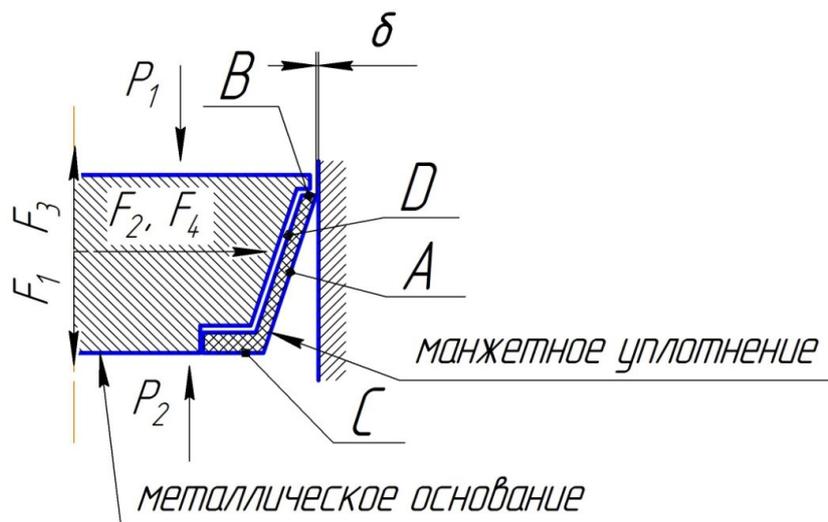


Рис. 1. Схема сил, действующих на манжетное уплотнение

Авторы в работе [8] совместно с ЛПИ (Ленинградский политехнический институт) проводили исследования поршня с комбинированными уплотнениями для снятия пиковых нагрузок. В качестве втулок были использованы гладкая и лабиринтная втулка с аккумулярующей емкостью расположенной перед манжетой (рис. 2).

ными уплотнениями для снятия пиковых нагрузок. В качестве втулок были использованы гладкая и лабиринтная втулка с аккумулярующей емкостью расположенной перед манжетой (рис. 2).

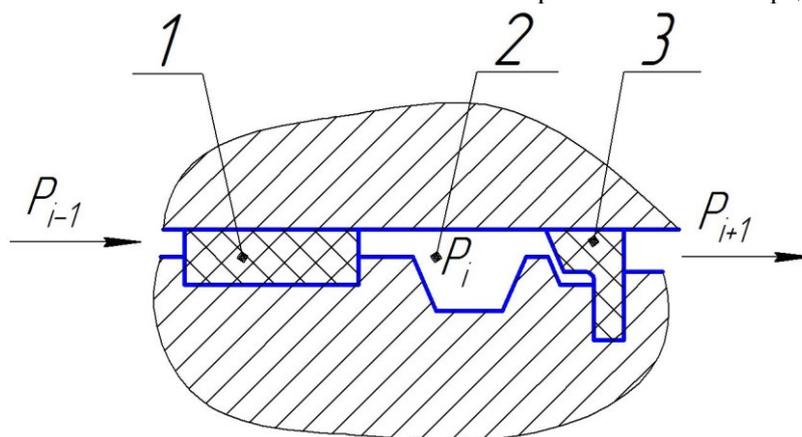


Рис. 2. Комбинированное уплотнение

1 – дроссельная втулка, 2 – аккумулярующая емкость, 3 – манжетное уплотнение.

При дросселировании газа в щели между втулкой и цилиндром с последующим расширением в аккумулярующей емкости давление газа перед манжетой удалось снизить на 25–30 % [8, 9], при этом ресурс работы уплотнения без смазки составил более 2000 ч. (при давлении

нагнетания 20 МПа). Авторы утверждают, что разгрузку отдельных элементов выполнить вполне реально, при этом наилучшие результаты следует ожидать в случае равномерного распределения давления по всему объему уплотнения, когда одновременно будут разгружены первые и

последние уплотнения. Величину уменьшения перепада давления (нагрузки) можно регулировать длиной дроссельной втулки, при этом важно помнить, что увеличение длины дроссельной втулки, приведет к увеличению мертвого объема, что не только уменьшит производительность поршневого компрессорного агрегата, но и может достичь предельного случая, когда производительность компрессора будет равной нулю, что категорически недопустимо для компрессорной техники.

Для решения данной проблемы авторами данной работы была предложена конструкция комбинированных уплотнений с обратной манжетным уплотнением, конструкции представлены на рисунке 3, фото на рисунке 4. Предложенная конструкция работает следующим образом: в процессе сжатия и нагнетания (когда нагрузка, действующая на цилиндропоршневое уплотнение имеет пиковое значение), газ под давлением (P_1) попадает в зазор между обратной манжетой и зеркалом цилиндра, в следствии чего дросселируется и расширяется в аккумулирующей камере, давление газа перед комплектом манжетных уплотнений снижается до давления (P_2). В процессе обратного расширения и всасывания сжатый газ, находящийся в объеме аккумулирующей камеры разожмет манжетное уплот-

нение, камера будет изолирована и не будет являться дополнительным мертвым объёмом. Это по сравнению с известным прототипом увеличит производительность.

Из формулы 1 видно, что уменьшая давление газа до давления P_1 перед комплектом манжетных уплотнений по сравнению с давлением газа перед поршнем мы значительно уменьшаем нагрузку, действующую на манжетное уплотнение, тем самым увеличиваем его ресурс работы.

Предложенное авторами цилиндропоршневое уплотнение позволяет снизить пиковые нагрузки, действующие на цилиндропоршневое уплотнение, что тем самым уменьшает его износ и увеличивает ресурс работы, не уменьшая производительность компрессорного агрегата.

Объект исследования. Объектом исследования в данной работе является конструкция наборного комбинированного уплотнения в четырех вариациях. Номинальный диаметр манжетных уплотнений – 50 мм, ширина – 5,5 мм, материал уплотнений – Ф4, материал втулок – Ф4К15М5. Диаметр втулок 49,9 мм, высота 5,5 и 11 мм. На рисунке 3 представлены схемы испытываемых наборных комбинированных уплотнений.

На рисунке 4 представлены фото испытываемых наборных уплотнений.

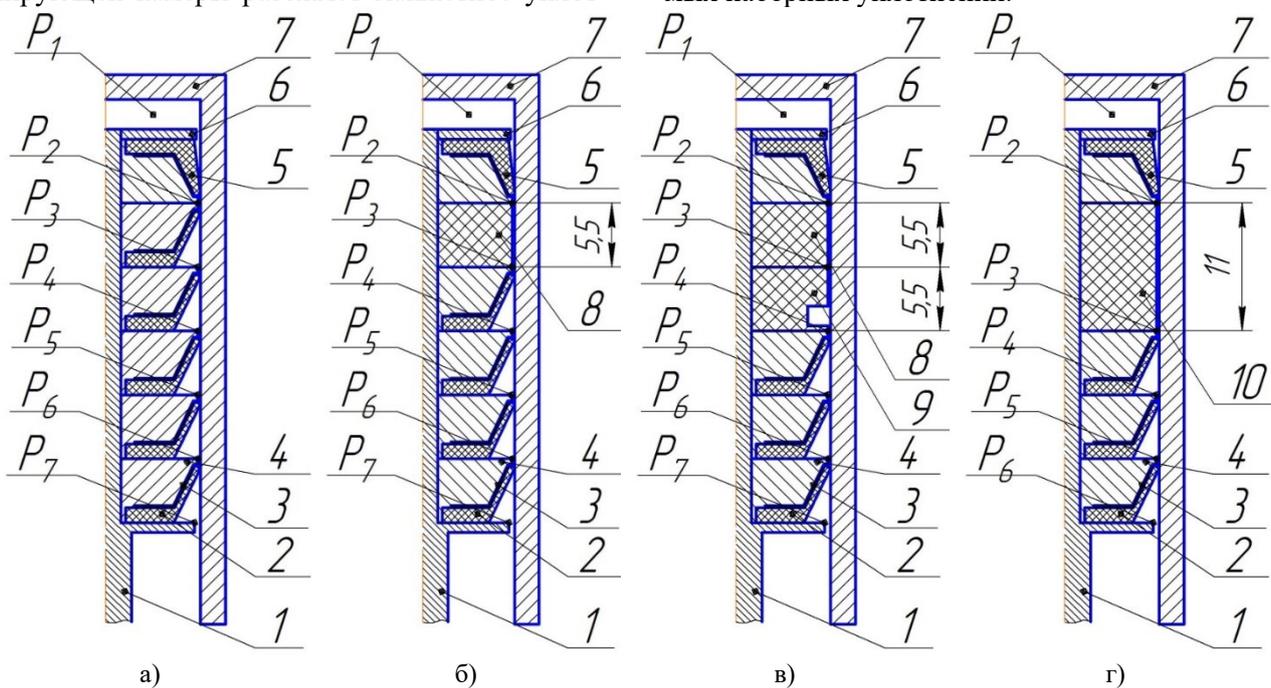


Рис. 3. Конструкции комбинированных цилиндропоршневых уплотнений:

- а – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой;
- б – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой, дроссельной втулкой длиной 5,5 мм;
- в – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой, дроссельной втулкой длиной 5,5 мм и аккумулирующей камерой длиной 5,5 мм;
- г – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой, дроссельной втулкой длиной 11 мм;
- 1 – поршень; 2 – манжетное уплотнение; 3 – экспандер; 4 – шайба; 5 – обратное манжетное уплотнение;
- 6 – прижимная шайба; 7 – рабочий цилиндр; 8 – дроссельная втулка (длиной 5,5 мм);
- 9 – шайба с аккумулирующим объемом; 10 – дроссельная втулка (длиной 11 мм).

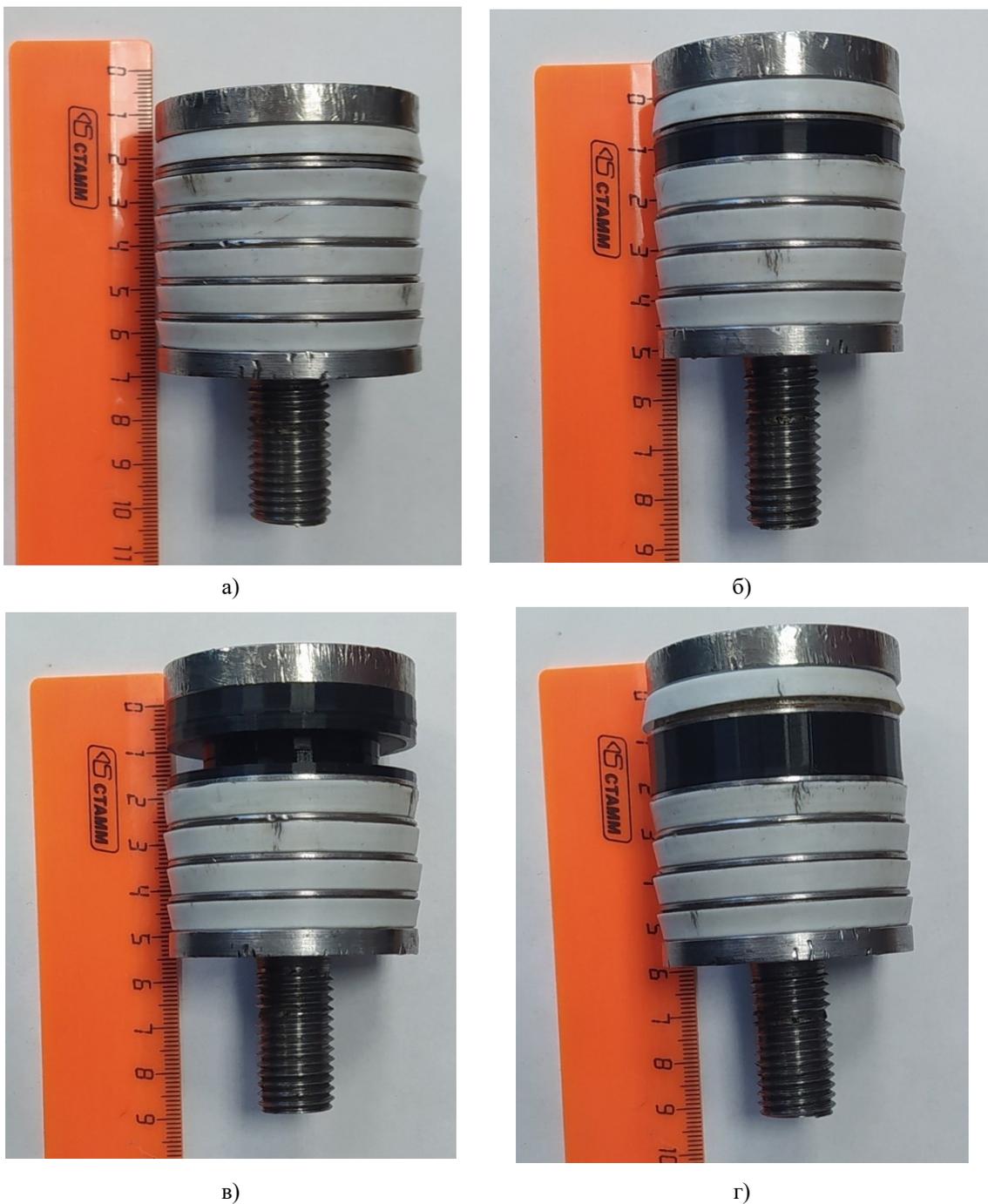


Рис. 4. Фото испытуемых комбинированных уплотнений:

4а – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой;

4б – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой, дроссельной втулкой длиной 5,5 мм;

4в – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой, дроссельной втулкой длиной 5,5 мм и аккумуляющей камерой длиной 5,5 мм;

4г – Комбинированное уплотнение с обратной манжетой, дроссельной втулкой длиной 11 мм.

Описание экспериментального стенда.

Для определения реальной нагрузки, действующей на цилиндропоршневое уплотнение, был разработан экспериментальный стенд, который представлен на рисунке 5.

На рисунке 6 представлен разрез оснастки с технологическими отверстиями для установки

датчиков давления. Датчик 1 фиксирует давление до наборного поршня, датчик 2 фиксирует давление после обратного манжетного уплотнения (после дроссельных втулок), датчик 3 фиксирует давление после третьего манжетного уплотнения и так далее по аналогии. На рисунке 6 показан общий вид блока наборного поршня, состоящего из манжетных уплотнений.



Рис. 5. Общий вид экспериментального стенда:
1 – емкость, 2 – оснастка, 3 – мультиметры, 4 – блок питания, 5 – баллон со сжатым воздухом.

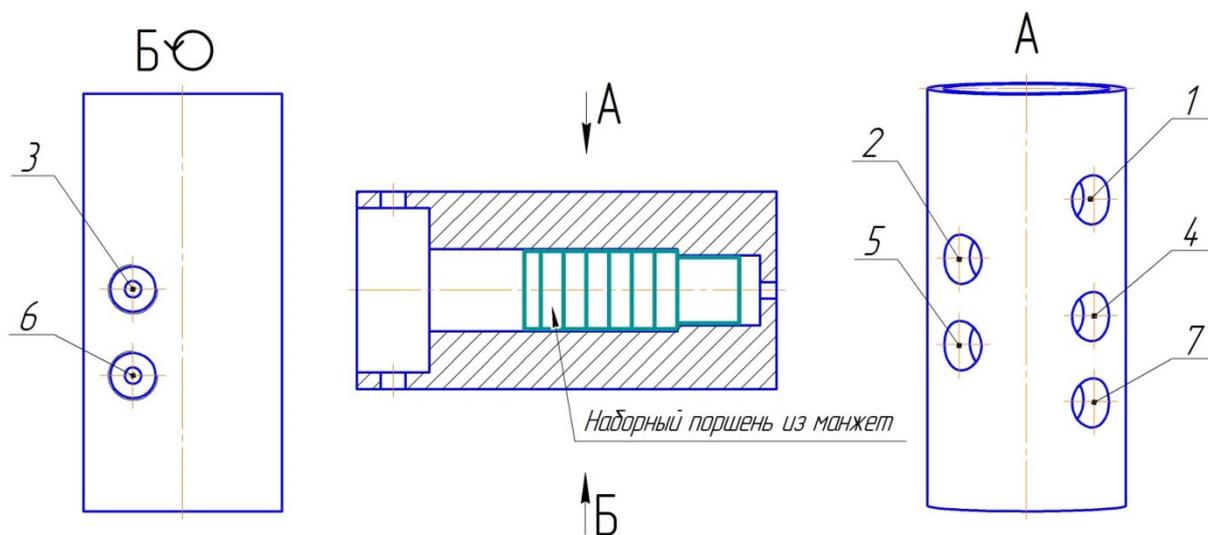


Рис. 6. Оснастка.

Эксперимент проводился следующим образом: в емкость 1 из баллона со сжатым воздухом 5 подавался газ требуемого давления (от 1 до 5 МПа), в момент достижения требуемого давления с мультиметров 3, которые в свою очередь подключены к датчикам давления, снимались показания. Один из мультиметров всегда был подключен к датчику давления, который фиксирует давление до наборного поршня, второй мультиметр подключался к датчику давления, который фиксирует давление после дроссельных втулок (перед последующим уплотнением). Полученные результаты распределения давления по наборному поршню различных комбинаций ком-

бинированного уплотнения (для давления в рабочей камере – 3МПа) представлены на рисунке 7. Стоит отметить, что данный процесс проведения эксперимента справедлив как для манжетного уплотнения, так и для кольцевых уплотнений.

Конструкция уплотнения согласно рисунку «Зв» дала схожие результаты с конструкцией согласно рисунку 3г, поэтому отдельной кривой на рисунке 7 не представлена.

Величина нагрузки была рассчитана по формуле 1, где коэффициент $\beta=1,58$. Результаты расчетов представлены на рисунке 8.

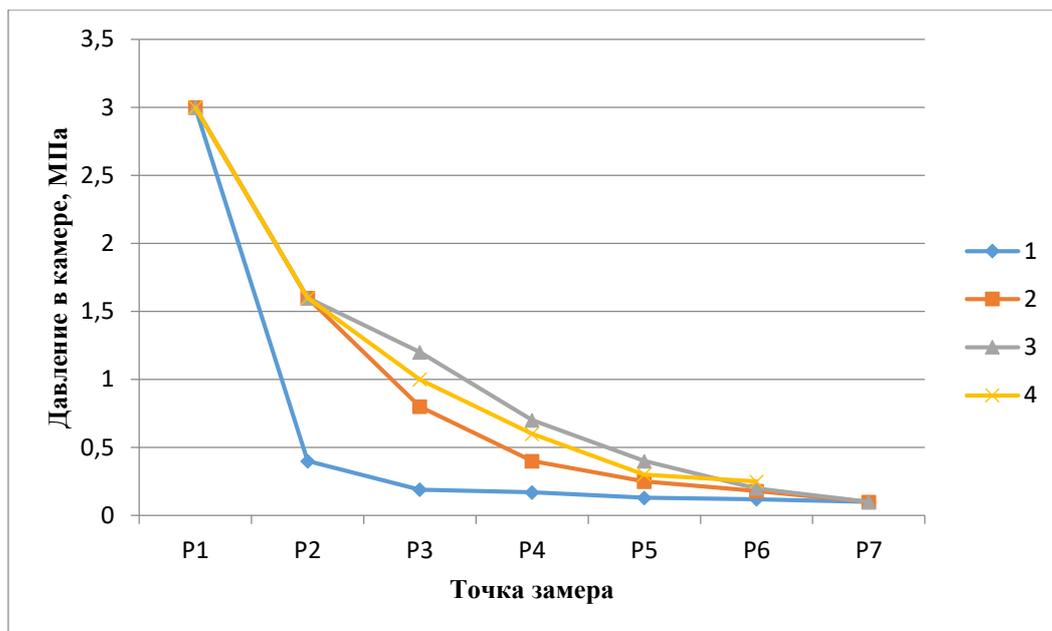


Рис. 7. Падение давления вдоль оси поршня:

- 1 – Кривая падения давления для стандартного наборного поршня (была получена ранее в работе [6])
- 2 – Кривая падения давления для конструкции согласно рисунку 3а;
- 3 – Кривая падения давления для конструкции согласно рисунку 3б;
- 3 – Кривая падения давления для конструкции согласно рисунку 3г.

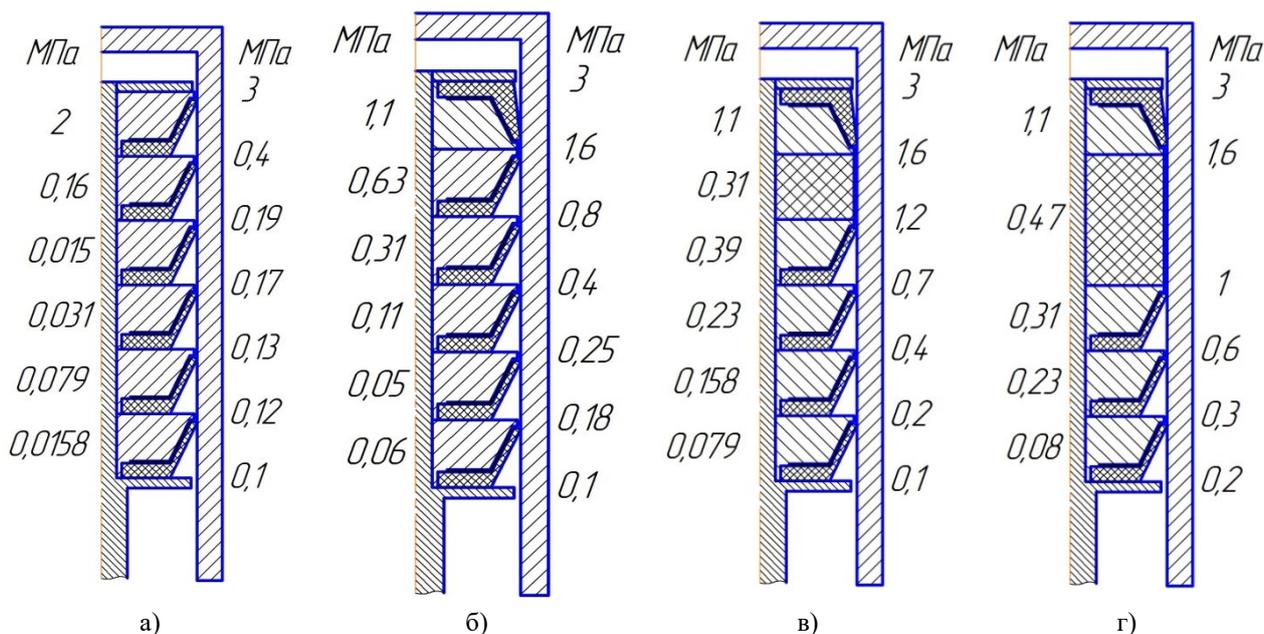


Рис. 8. Нагрузка, действующая на уплотнения:

- а) стандартный наборный поршень; б) наборный поршень с обратным манжетным уплотнением;
- в) наборный поршень с дроссельной втулкой 5,5 мм; г) наборный поршень с дроссельной втулкой 11 мм

Результаты. Анализируя рисунок 8, видно, что в стандартном наборном поршне при давлении в рабочей камере 3 МПа первое уплотнение работает при пиковой нагрузке 2 МПа (стоит отметить, что данная нагрузка при температуре в рабочей камере 100–120 °С является предельно допустимой), используя конструкцию, представленную на рисунке «3а», удалось перераспределить пиковую нагрузку до 1,1 МПа на обратное

манжетное уплотнение и 0,63 МПа на первое манжетное уплотнение. Учитывая тот факт, что ресурс работы уплотнения напрямую зависит от воспринимаемой нагрузки, то снизив пиковую нагрузку с 2 МПа до 1,1 МПа ресурс работы всего цилиндропоршневого уплотнения, теоретически, увеличивается в 2 раза. Используя конструкцию согласно «3б», удалось снизить нагрузку на ман-

жетное уплотнение с 0,63 МПа до 0,39 МПа. Используя конструкцию «3г», удалось снизить нагрузку с 0,63 МПа до 0,31 МПа. Важно при использовании подобной конструкции уплотнения контролировать коэффициент подачи, чтобы утечки газа находились в допустимых пределах.

Выводы и рекомендации. В процессе проведения исследований было выявлено, что для более качественного снижения нагрузки, действующей на уплотнения, необходимо добиваться того, чтобы обратное манжетное уплотнение воспринимало как можно меньшую нагрузку (необходимо регулировать первоначальное разжатие за счет экспандера), а весь процесс дросселирования газа приходился на дроссельные втулки, чтобы давление до первого манжетного уплотнения было как можно меньше. Также большое влияние на дросселирование давления оказывает диаметр дроссельных втулок. В идеальном состоянии втулки необходимо изготавливать диаметром несколько больше чем диаметр цилиндра, проводить предварительную притирку вхолостую, для обеспечения минимального зазора (на уровне микронеровностей). Длина втулок должна быть подобрана оптимальным образом, обеспечить необходимый уровень снижения нагрузки, при этом массогабаритные параметры поршня не должны быть превышены (при условии, что разработанное уплотнение устанавливается в уже эксплуатирующий агрегат). Дальнейшие исследования будут направлены на определение геометрических параметров дроссельных втулок с целью оптимизации конструкции и дальнейшего повышения ресурса работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаренко В.П. Основы теории уплотнений и создание поршневых компрессоров без смазки: дис. докт. тех. наук. Санкт-Петербург., 2001. 159 с.

2. Трухин А.Х. Повышение надежности и долговечности поршневых компрессорных агрегатов. М.: Машиностроение, 1972, 176 с.

3. Новиков И.И., Захаренко В.П., Ландо Б.С. Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах. Л.: Машиностроение, 1981. 238 с.

4. РД 39-0148139-0001-2000. Система технического обслуживания и ремонта компрессорных станций на базе технической диагностики.

5. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет /2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2000. 456 с.

6. Бусаров С.С., Бусаров И.С., Титов Т.С. Экспериментальное определение условных зазоров цилиндропоршневых уплотнений компрессорных агрегатов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3. № 1. С. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56.

7. Фотин Б.С., Пирумов И.Б., Прилуцкий И.К., Пластинин П.И. Поршневые компрессоры; Под общ. ред. Б. С. Фотина. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 372 с.

8. Захаренко А.В., Захаренко В.П. О расчете нагрузок в многокольцевом поршневом уплотнении компрессоров без смазки высокого давления // Вестник МАХ. 2012. № 2. С. 29–32.

9. Пинчук Л.С. Создание и исследование герметизирующих систем в машиностроение на основе термопластов: Автореф. канд. дис. Минск, ИЗД. АН БССР, 1974. 20 с.

10. Френкель М.И. Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования. 3-е издание, переработанное и дополненное. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.

11. Мирзоев Р.Г., Кугушев И.Д., Брагинский В.А. Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления. Учебное пособие для студентов вузов. Л., «Машиностроение». 1972. 416 с.

12. Майер Э.А. Торцевые уплотнения: Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.

13. Голубев А.И., Кондаков Л.А., Овандер В.Б. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.

14. Краснов В.И., Жильцов А.М., Набержнев В.В. Ремонт центробежных и поршневых насосов нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий : Справ. изд. М.: Химия, 1996. 320 с.

15. Сорокин Б.И., Соколов А.Н. Уплотнительные устройства горных машин и комплексов. М.: Недра, 1969. 128 с.

Информация об авторе

Кобыльский Роман Эдуардович, инженер, ассистент. E-mail: roman.kobylsky@gmail.com. Омский государственный технический университет. Россия, 644050, Омск, ул. Проспект Мира, д. 11.

Поступила 18.02.2022 г.

© Кобыльский Р.Э., 2022

Kobylsky R.E.

Omsk State Technical University

E-mail: roman.kobylsky@gmail.com

THE USE OF A COMBINED SEAL TO REDUCE THE LOAD ACTING ON THE CYLINDER PISTON SEAL

Abstract. In this scientific paper, the importance of the life of the cylinder piston seal for medium and high pressure reciprocating compressor units is considered. The scheme of forces acting on the seal (valid for both piston rings and cuff seals) is considered. The basic calculation formulas are given and a promising design of a combined seal is proposed to increase the service life of the entire compressor unit operating mainly without lubrication of the flow part of the cylinder. To solve this problem, a hypothesis is put forward about the possibility of reducing the load on the seal by throttling the gas, thereby not reducing the performance of the piston unit. In addition, diagrams and photos of a promising design of a combined seal (four combination options) are given. A detailed description of the experimental stand for determining the pressure drop (load) acting on the cuff seal is made. The procedure for conducting an experimental study is also described. As a result, it is found that the use of a combined seal allows to reduce the pressure drop on the first seal by about two times from 2 MPa to 1.1 MPa. Thus, the service life of the seal, theoretically, increases proportionally to the decrease in the pressure drop, also by two times.

Keywords: lip seal, reciprocating compressor, cylinder piston group, sealing resource, compressor efficiency.

REFERENCES

- Zaharenko V.P. Fundamentals of the theory of seals and the creation of reciprocating compressors without lubrication [Osnovy teorii uplotnenij i sozdanieporshnevnyh kompressorov bez smazki: dis.dokt.tekh.nauk]. Sankt-Peterburg., 2001. 159 p. (rus).
- Trukhin A.H. Improving the reliability and durability of reciprocating compressor units [Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti porshnevnyh kompressornyh agregatov]. M.: Mashinostroenie, 1972. 176 p. (rus).
- Novikov I.I., Zakharenko V.P., Lando B.S. Oil-free piston seals in compressors [Bessmazochnye porshnevye uplotneniya v kompressorah]. L.: Mashinostroenie, 1981. 238 p. (rus).
- RD 39-0148139-0001-2000. System of maintenance and repair of compressor stations based on technical diagnostics [Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kompressornyh stancij na baze tekhnicheskoy diagnostiki] (rus).
- Plastinin P.I. Piston compressors. Volume 1. Theory and Calculation. 2nd ed., reprint. and add [Porshnevye kompressory. Tom 1. Teoriya i raschet. 2-e izd., pererab. i dop]. M.: Kolos, 2000. 456 p. (rus)
- Busarov S.S., Busarov I.S., Titov T.S. Experimental determination of conditional clearances of cylinder piston seals of compressor units [Eksperimental'noe opredelenie uslovnnyh zazorov cilindroporshnevnyh uplotnenij kompressornyh agregatov]. Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation, rocket and power engineering. 2019. Vol. 3. No. 1. Pp. 50–56. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-50-56 (rus)
- Fotin B.S., Pirumov I.B., Prilutsky I.K., Plastinin P.I. Reciprocating compressors; Under the general ed. of B. S. Fotin [Porshnevye kompressory; Pod obshch. red. B. S. Fotina]. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. 372 p. (rus).
- Zakharenko A.V., Zakharenko V.P. On the calculation of loads in a multi-ring piston seal of compressors without high-pressure lubrication [Raschete nagruzok v mnogokol'cevom porshnevom uplotnenii kompressorov bez smazki vysokogo davleniya]. Bulletin of MAX. 2012. No. 2. Pp. 29–32. (rus).
- Pinchuk L.S. Creation and research of sealing systems in mechanical engineering based on thermoplastics [Sozдание i issledovanie germetiziruyushchih sistem v mashinostroenie na osnove termoplastov]: Avtoref. kand. dis. Minsk, IZD. AN BSSR, 1974. 20 p. (rus).
- Frenkel M.I. Reciprocating compressors: theory, designs and fundamentals of design- 3rd edition, revised and supplemented [Porshnevye kompressory: teoriya, konstrukcii i osnovy proektirovaniya. 3-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe]. L.: Mashinostroenie, 1969. 744 p. (rus).
- Mirzoev R.G., Kugushev I.D., Braginsky V.A. Fundamentals of design and calculation of plastic parts and technological equipment for their manufacture. Study guide for university students [Osnovy konstruirovaniya i rascheta detalej iz plastmass i tekhnologicheskoy osnastki dlya ih izgotovleniya. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov]. L., Mashinostroenie. 1972. 416 p. (rus).
- Mayer E.A. Mechanical seals: Trans. from ger [Torcevye uplotneniya : Per. s nem]. M. : Mashinostroenie, 1978. 288 p. (rus).
- Golubev A.I., Kondakov L.A., Ovander V.B. Seals and sealing equipment: Handbook [Upotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik]. M. : Mashinostroenie, 1986. 464 p. (rus)

14. Krasnov V.I., Zhiltsov A.M., Naberzhnev V.V. Repair of centrifugal and piston pumps of oil refining and petrochemical enterprises : Reference ed [Remont centrobezhnyh i porshnevnyh nasosov neftepererabatyvayushchih i neftekhimicheskikh

predpriyatij : Sprav. izd]. M.: Himiya, 1996. 320 p. (rus)

15. Sorokin B.I., Sokolov A.N. Sealing devices of mining machines and complexes [Uplotnitel'nye ustrojstva gornyh mashin i kompleksov]. M.: Nedra, 1969. 128 p. (rus)

Information about the author

Kobylsky Roman E. Engineer, Assistant. E-mail: roman.kobilsky@gmail.com. Omsk State Technical University. Russia, 644050, Omsk, Prospekt Mira str., 11.

Received 18.02.2022

Для цитирования:

Кобыльский Р.Э. Применение комбинированного уплотнения для снижения нагрузки, действующей на цилиндропоршневое уплотнение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 117–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-117-125

For citation:

Kobylsky R.E. The use of a combined seal to reduce the load acting on the cylinder piston seal. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 7. Pp. 117–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-117-125