

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

4

2023

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**

№ 4, 2023 год

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

Vol. 4. 2023

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)
- 2.5.21. – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	14.04.2023
Выход в свет	27.04.2023

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 15,75. Тираж 40 экз. Заказ № 45

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2023

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)
- 2.5.21. – Machines, aggregates and technological processes (technical sciences)

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	14.04.2023

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Яцул 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. Graboviy, Doctor of Economic Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National research University) (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Кожухова Н.И.

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ
ВЯЖУЩИХ

8

**Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В.,
Вашева С.В.**

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГИПСОВЫХ
ВЯЖУЩИХ С КОМПЛЕКСОМ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК

24

Траутвайн А.И., Тимофеев Д.Г.

РАЗРАБОТКА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА
КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НА ОСНОВЕ
АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

34

Поваров А.В., Трушин Ю.Е.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ СТЕН
МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ ВТОРИЧНОГО ЖИЛИЩНОГО
ФОНДА Г. САРАТОВА

46

Алимова Д.Н., Перькова М.В.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
СТАНДАРТОВ, РЕГУЛИРУЮЩИХ ПРОЦЕССЫ «ЗЕЛЕННОГО» СТРОИТЕЛЬСТВА

55

Ивина М.С., Рахимова П.С.

ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА В СТРУКТУРЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
МОЛОДЕЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ

67

Банцорова О.Л., Касимова А.Р.

ПРИМЕНЕНИЕ БИОАНАЛОГОВОГО МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МОБИЛЬНЫХ ЖИЛИЩ

77

Большаков А.Г., Тикунова С.В.

ПРИНЦИПЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПАРКА
В АКАДЕМГОРОДКЕ ГОРОДА ИРКУТСКА

87

Семенцов С.В., Козырева Е.А.

УСАДЬБЫ ВЫСШЕЙ ЗНАТИ НА ТЕРРИТОРИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
И БЛИЖНИХ УЕЗДОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ ГУБЕРНИИ

В 18 – НАЧАЛЕ 20 ВЕКА

97

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Шабанов Д.В.

ЭФФЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВЫХ СИЛ МЕЖДУ РОБОТАМИ
ПРИ ГРУППОВОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГРУЗА

106

Пегачков А.А.

ПОВЫШЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕГУЛИРУЕМЫХ
МЕХАНИЗМОВ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ДВИГАТЕЛЯ КАМАЗ

119

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Kozhukhova N.I. BACKGROUND OF GEOPOLYMER-BASED CELLULAR CONCRETE PRODUCTION	8
Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Vasheva S.V. FEATURES OF STRUCTURE FORMATION OF COMPOSITE GYPSUM BINDERS WITH A COMPLEX OF MINERAL AND ORGANIC ADDITIVES	24
Trautvain A.I., Timofeev D.G. DEVELOPMENT OF VARIOUS TYPES OF CEMENTS FOR THE DEVICE OF STRUCTURAL LAYERS OF ROAD PAVEMENT BASED ON ASPHALT GRANULAR CONCRETE MIXTURES	34
Povarov A.V., Trushin Y.E. IMPROVEMENT OF THE THERMAL INSULATION SYSTEM WALLS OF APARTMENT BUILDINGS OF THE SECONDARY HOUSING OF THE CITY OF SARATOV	46
Alimova D.N., Perkova M.V. COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARDS FOR GREEN BUILDING	55
Ivina M.S., Rakhimova P.S. PUBLIC SPACES IN THE STRUCTURE OF MULTIFUNCTIONAL YOUTH SPACES	67
Bantserova O.L., Kasimova A.R. APPLICATION OF THE BIO-ANALOGUE DESIGN METHOD IN THE FORMATION OF MOBILE DWELLINGS FOR TEMPORARY STAY	77
Bolshakov A.G., Tikunova S.V. PRINCIPLES OF URBAN ORGANIZATION OF THE PARK IN IRKUTSK	97
Sementsov S.V., Kozyreva E.A. ESTATES OF THE HIGHEST NOBILITY IN THE TERRITORIES OF ST. PETERSBURG AND NEIGHBORING COUNTIES OF ST. PETERSBURG PROVINCE IN THE 18TH-EARLY 20TH CENTURY	87

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Shabanov D.V. EFFICIENT DISTRIBUTION OF TRACTION FORCES BETWEEN ROBOTS DURING COOPERATIVE CARGO TRANSPORTATION	106
Pegachkov A.A. IMPROVING THE PERFORMANCE OF ADJUSTABLE MECHANISMS BY EXAMPLE GAS DISTRIBUTION SYSTEMS FOR KAMAZ ENGINES	119

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-22

Кожухова Н.И.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**Московский политехнический университет**E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru*

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА ЯЧЕЙСТЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ ВЯЖУЩИХ

Аннотация. Геополимерные системы в настоящее время являются довольно перспективным направлением среди ученых строительного материаловедения в аспекте бесцементных энергоэффективных вяжущих и материалов атермального синтеза благодаря широкому перечню их положительных свойств, вполне конкурирующих с традиционными аналогами типа цемента и цементобетона. В статье произведен литературный обзор имеющегося на сегодняшний день исследовательского и практического опыта среди отечественных и зарубежных ученых по вопросу синтеза ячеистых бетонов на основе геополимерных вяжущих. На основании проведенного обзорного анализа современных публикаций по данной тематике за последние 20–25 лет было показано, что ключевыми параметрами, которые оказывают доминирующее влияние на формирование качественной поровой структуры, а также теплофизических и механических свойств ячеистого геополимербетона являются: выбор и подготовка основного сырья с учетом его химической природы и микроструктуры системы; вид модифицирующего и порообразующего компонента; последовательность введения компонентов; условия и режим твердения; технология порообразования и т.д. В результате аналитического исследования также было выявлено, что, несмотря на довольно большое количество трудов, посвященных получению ячеистых геополимерных систем, в целом, на сегодняшний день отсутствует глубокое понимание принципов формирования и особенностей поведения поровой структуры в эксплуатационный период геополимеров.

Ключевые слова: геополимер, ячеистый бетон, поровая структура, способы синтеза, эксплуатационные свойства.

Введение. Принято считать, что для производства материалов строительного назначения в больших объемах наиболее целесообразно применение энергосберегающих технологий, например, использующих температуру окружающей среды или незначительно повышенную температуру, что обеспечивает получаемой продукции более высокую экономическую и экологическую эффективность и рентабельность, а, следовательно, более высокую привлекательность для промышленной индустрии [1, 2]. С другой стороны, тенденции к реализации энергосберегающих технологий могут быть достигнуты не только в процессе получения композитов по технологиям так называемого атермального синтеза, но и за счет использования материалов, обеспечивающих энергоэффективную эксплуатацию зданий и сооружений, созданных с их применением. К таковым относятся материалы и композиты с высокопористой ячеистой структурой.

Научный интерес к ячеистым материалам обусловлен широким спектром потенциальных сфер применения [3, 4]. Необходимыми свойствами для высокопористых материалов являются, например, низкая объемная плотность, высокая проницаемость [5], высокая удельная поверхность, низкие показатели теплопроводности

[6] и/или эффективная комбинация этих параметров, с учетом требований в реалиях промышленного применения. Каждая из выше перечисленных характеристик тесно связана и напрямую воздействует на формирование микроструктуры затвердевшего порового каркаса, влияет на его химическую природу [7], а также характер пористости. Принято считать, что структура с точки зрения морфологии [8], объемной концентрации пор и источника происхождения газообразной субстанции, заполняющей поровое пространство, оказывают доминирующее влияние на эффективность получаемого ячеистого композита. Как следствие, ключевым фактором при формировании требуемых свойств ячеистого материала является эффективный подбор сырьевых компонентов и способа их обработки в процессе подготовки сырья и, непосредственно, синтеза самого материала.

Своей актуальностью в перечне ячеистых материалов отличаются легковесные композиты на основе геополимерного вяжущего: ячеистые геополимербетоны и, в частности, газо- и пенобетоны [1, 9–11], которые находятся в соответствии с современными мировыми тенденциями развития строительного рынка, и ориентированы не только на достижение энергоэффективности в

строительной отрасли, но также на снижение негативного воздействия на окружающую среду, сокращению выбросов углекислого газа и уменьшению истощения природных ресурсов. Благодаря особенностям технологии и химии синтеза, геополимерные материалы и изделия обладают весьма хорошей перспективой для дальнейшего развития и практического применения различной целевой направленности.

В рамках этого исследования был проведен литературный обзор по различным технологиям получения геополимерных вяжущих и ячеистых

геополимеров на основе широкого спектра алюмосиликатного сырья. В настоящее время большое количество зарубежных ученых и исследователей по всему миру [1, 12–15] работают над вопросом создания геополимеров и ячеистых бетонов на их основе (рис. 1).

Целью настоящего исследования является изучение и анализ отечественного и зарубежного опыта научных изысканий и применения на практике теоретических результатов по вопросу особенностей синтеза ячеистых геополимербетонов и их основных эксплуатационных характеристик.



Рис. 1. Научные центры, занимающиеся изучением и производством геополимеров и ячеистых бетонов на их основе (отмечены красными точками на карте)

Методология. Объектом исследования являются ячеистые бетоны на основе геополимерных вяжущих систем различного компонентного состава и разных технологий производства. Методом обзорного анализа и оценки отечественных и зарубежных опубликованных научных исследований выявлены особенности подбора сырьевых материалов и технологических режимов, обеспечивающих эффективность формирования ячеистой структуры геополимерной матрицы. Произведена сравнительная оценка некоторых методов получения ячеистых геополимербетонов.

Основная часть. Как правило, условия твердения, используемые при синтезе геополимеров и материалов на их основе, включают консолидацию матрицы в условиях атмосферного давления и в температурном диапазоне от 25 °C до 150 °C [16]. Однако этот диапазон параметров является весьма обобщенным, поскольку, в силу

широкого разброса свойств потенциального сырья для геополимеров, условия процесса синтеза подбираются индивидуально.

Так, например, исследования [17] геополимерной смеси на основе метакрилатов, твердеющей в температурном диапазоне 10–80 °C в течение 1–4 ч показали, что повышенная температура ускоряет набор прочности, однако, конечная прочность после 28 суток ниже, чем в аналогичных смесях, которые твердеют при комнатной температуре. Данное явление объясняется наличием у метакрилатов замедленной реакционной способностью при повышенных температурах. Таким образом, проявляется низкая степень полноты протекания реакции геополимеризации, демонстрирующая кинетику и характер изменения системы в процессе структурообразования [18].

С другой стороны, для геополимеров на основе золы-уноса из-за более низкой реакционной способности золы-уноса, твердение при повышенной температуре в данном случае более предпочтительно по сравнению с метакрилатом [19].

Аналогичная тенденция характерна для геополимеров как с плотной, так и с ячеистой структурой.

Так, в некоторых исследованиях установлен положительный эффект высокотемпературного воздействия на эксплуатационные характеристики ячеистого геополимера [20]. Например, Fletcher R.A., MacKenzie K.J.D. [21] установили, что после обжига «спеченный» ячеистый геополимерный бетон имеет сравнительно однородную структуру, равномерное распределение пор и пустот, а также высокое соотношение прочности и плотности. В связи с этим, наиболее целесообразно рассматривать его, как пористую керамику, а не как бетон. Он подходит для использования в качестве строительного материала для замены существующих видов керамической плитки, глиняного кирпича и строительных блоков.

Говоря о керамике, ближайшим аналогом для геополимера с идентичным механизмом структурообразования (полимеризация) следует отметить наноструктурированное вяжущее. В работе авторов [22] был получен пенобетон на основе перлитового наноструктурированного вяжущего со следующими эксплуатационными параметрами: классом по прочности B1,5–B2,5, маркой по плотности D300–D500, соответственно и коэффициентом теплопроводности в диапазоне от 0,08 до 0,1 Вт/(м·°C).

Наибольший интерес в русле исследования ячеистых геополимербетонов представляют работы по применению золы-уноса [23–25].

Sanjayan J., Nazari A. и другие [26] предложили стандартный подход для синтеза газобетона на основе золы-уноса, используя алюминиевую пудру в качестве газообразователя. Показатели прочности на сжатие для полученных пористых образцов колеблются в пределах 0,9–4,35 МПа, что позволяет использовать этот газобетон для производства кирпича, огнестойких панелей, подземных трубопроводов и т.д.

Имеется ряд работ, подтверждающих возможность использования метакаолина при создании ячеистого геополимерного бетона [27, 28].

Так, в 2012 году, в Китае были запатентованы изделия из ячеистого геополимера на основе метакаолина [29], которые обеспечивают пористость от 35 до 80 %, предел прочности при сжатии от 1,7 до 10,9 МПа при соответствующей плотности от 300 до 1240 кг/м³. Для газообразования в материале используется алюминиевая паста. Твердение происходит при температуре в диапазоне 40–100 °C в течении 4–8 часов. Данный ячеистый геополимер может быть использован в теплоизоляционных, звукоизоляционных, мембранных материалах, а также в материалах, поглощающих отходящие газы, энергию и т. д.

Однако негативной особенностью ячеистых геополимеров на основе метакаолина является повышенная усадка при воздействии температуры в условиях сушки или при нагреве, вызывающих микро- и макроскопические растрескивания в структуре. С целью повышения эффективности их применения для возможности получения огнеупорных композитов, ученые Zhang Z., Provis J. и другие в работе [1] разработали два типа ячеистых геополимеров, используя H₂O₂ и Al-пудру, в качестве газообразующих агентов. Твердение образцов осуществлялось при 200 °C, при постепенном повышении давления от 1,5–4 МПа до 12 МПа. Результаты показали, что использование H₂O₂ обеспечивает высокую прочность на сжатие (44–77 МПа). Однако, получаемый газобетон не устойчив к растрескиванию при высокотемпературном воздействии (1200 °C в течение 3 ч). В то же время, образцы с использованием Al-пудры устойчивы к трещинообразованию при повышенных температурах.

Несколько иные подходы при создании данных ячеистых геополимерных материалов были предложены учеными с использованием различных отходов промышленности, таких как доменный шлак, рисовая шелуха, металлургические и стекольные отходы [30–33].

В Национальном университете Чуннам (Южная Корея) [34] для получения ячеистого геополимерного бетона в качестве экологичного материала при возведении морских ферм используют побочные продукты сталелитейной промышленности. Экспериментальные результаты показали довольно высокую прочность образцов – до 11,9 МПа при пористости 25 %. Порообразование происходит в результате вспенивания гранулированных удобрений и шлака при особом режиме перемешивания.

Для создания пористых геополимеров учеными из университета Лиможа (Франция) [33] использовалась композиция из метакаолина, затворяемого раствором силиката и гидроксида калия. Добавление микрокремнезема как порообразующего агента способствует формированию неорганической пены. Свободные атомы кремния, содержащиеся в микрокремнеземе, реагируют с щелочным раствором с образованием молекул водорода в рабочей среде, повышенной основности.

Zhao Y., Ye J., Lu X. и другие [35] из Даляньского технологического университета (Китай) синтезировали геополимерный пенобетон с использованием золы-уноса и порошка от листового стекла, в качестве твердофазных компонентов. В качестве пенообразователя использовалось соединение додецилбензолсульфоната

натрия и растительный белок – глютен. Основные этапы синтеза этого пенобетона включают такие переделы как подготовка пеномассы, формование и сушка при температуре 105 °С в течение 12 ч, затем спекание при 1050 °С в течение 2 ч. Внешний вид и структура пор полученного геополимерного композита показаны на рисунке 2. Пористая структура кажется однородной в

миллиметровом диапазоне. В дополнение к фазам кварца и муллита, анортит ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) образуется после спекания. Считается, что данный минерал является главной причиной обеспечения высокой прочности. Данный образец был синтезирован с содержанием 13 % порообразователя по массе сухого материала, и показал прочность на сжатие до 6,76 МПа и среднюю плотность – 0,414 г/см³.

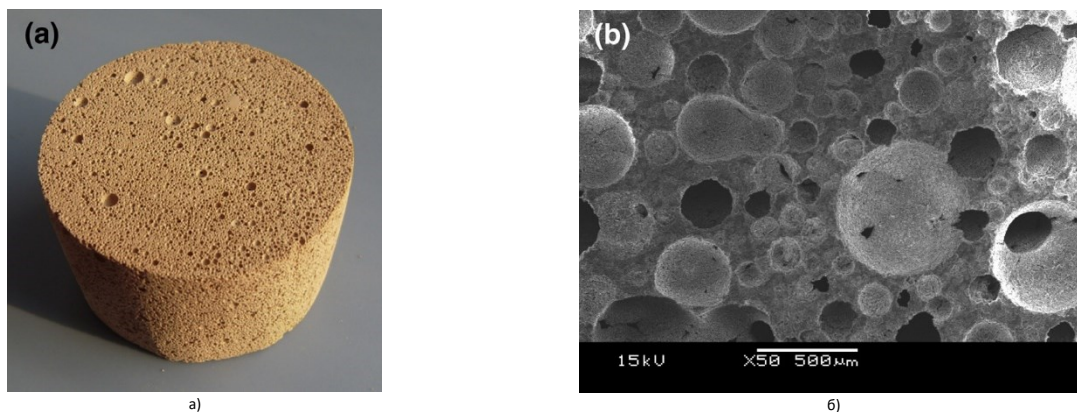


Рис. 2. Макро- (а) и микроструктура (б) «спекенного» геополимербетона [35]

На основании литературных данных [36, 37] ячеистые геополимербетоны также могут быть синтезированы с использованием пенополистирола и талька.

Шлаки и золы-уноса могут быть использованы для производства пеностекла, которое, с учетом используемых сырьевых компонентов, можно считать разновидностью ячеистого геополимера.

Еще один вариант ячеистого геополимера – пеностекло на основе зол-уноса. Пеностекло представляет собой материал, который вызывает к себе большой интерес и применяется во многих областях, таких как строительство, химическая и оборонная промышленность, что обусловлено

комплексными свойствами данного материала, такими как, негорючесть, низкие показатели теплопроводности, плотности и др.

Ul Haq E. и Licciulli A. [25] изучали использование золы-уноса для синтеза пеностекла с использованием различных пенообразователей. Данный метод имеет недостаток в виде образования токсичных газов при удалении порообразователя термообработкой.

Профессор Kamseu E. из итальянского университета в своей работе [38] также разработал метод получения пеноматериалов на основе геополимеров с использованием метакрилатов и Al-пудры с соотношением жидкой фазы и метакрилатов в соотношении 1:1,6 (рис. 3).

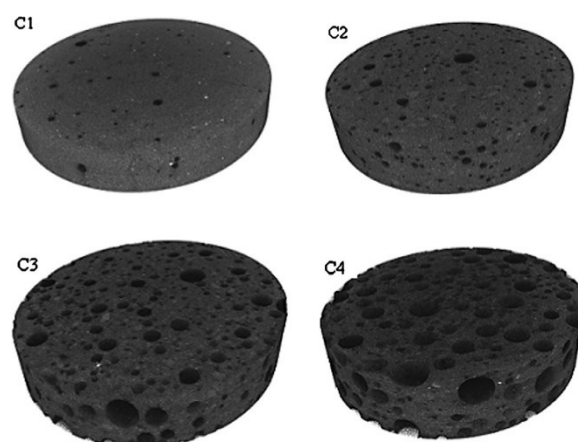


Рис. 3. Геополимеры, вспененные с различным содержанием Al-пудры: образцы C1, C2, C3 и C4 содержат 5, 10, 15 и 20 мг Al-пудры, соответственно [38]

Пористость такого материала составляет от 30 до 70 %. Для достижения гомогенной пористой структуры, необходимо высокое соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1,79$. Пеноматериалы в этом случае обладают гораздо меньшей теплопроводностью (0,15–0,4 Вт/м·К), чем плотные геополимеры (0,6 Вт/м·К) при равных условиях твердения (комнатная температура).

В докладе китайских исследователей Zhang Z., Wang H. и других, представленном на 21-й Австралоазиатской конференции, отображен метод механического предварительного вспенивания для получения пенобетона на основе кислой золы-уноса (содержание CaO в составе золы-уноса – 2,6 масс. %) [39]. На рисунке 4 показан образец этого пенобетона и его микроструктура. Размер пустот, в основном, колеблется в пределах 50–400 мкм со средним коэффициентом

округленности 0,6. Материал имеет плотность 850–950 кг/м³ при прочности на сжатие 4–9 МПа в зависимости от типа щелочного активатора.

Профессор Al Bakri Abdullah M.M. [11] из университета Перлис (Малайзия) получил геополимерный пенобетон с использованием высококальциевой золы-уноса (содержание CaO в составе золы-уноса – 21,6 %), путем смешивания пены с геополимерной смесью в объемном соотношении 2:1. При этом твердение осуществлялось в двух различных условиях: комнатная температура и тепловая сушка при 60 °С в течении 24 ч с последующим твердением в нормальных условиях. При тепловой сушке изделия продемонстрировали более высокие показатели пористости, но, при этом, довольно высокие значения плотности по сравнению с аналогами без термообработки.

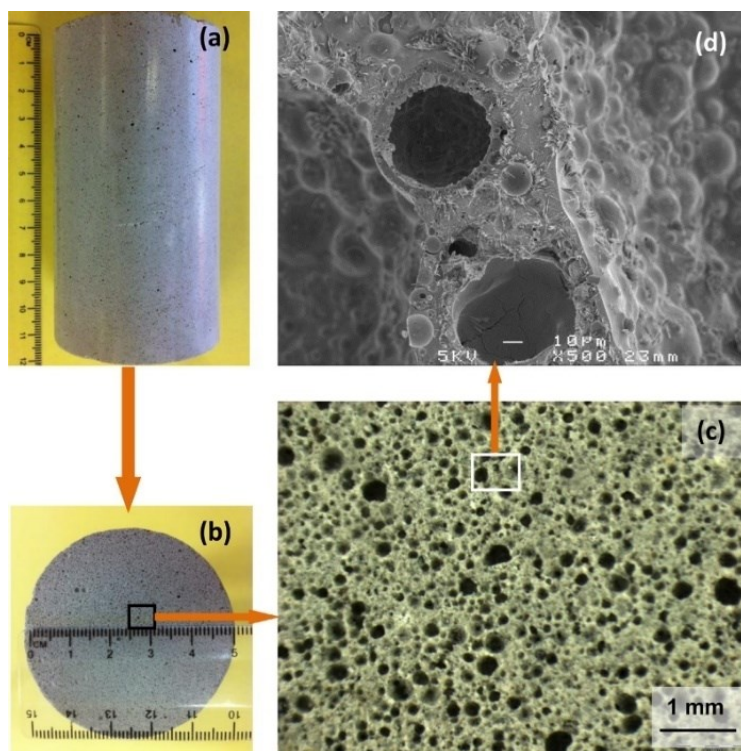


Рис. 4. Геополимерный пенобетон с использованием основной золы-уноса [11]

Рассматривая различия между плотными и ячеистыми геополимерами, необходимо отметить, что такие химико-технологические параметры как особенности порообразующих агентов, способы их введения в геополимерную систему, а также влияние на поро- и фазообразование в вяжущей системе, в том числе, под действием высоких температур, слабо изучены [40, 41]. В настоящее время алюминиевая пудра широко используется для образования пор в газобетоне на основе цемента, в то время как использование ее для газобетона в геополимерных системах носит экспериментальный характер. Уста-

новлено, что дозировка, реакционная способность (в том числе степень дисперсности) и диссоциация Al-пудры оказывает влияние на формирование поровой структуры геополимерных систем на атомном и наноструктурном уровнях [38, 42].

Турецкими исследователями [43] было выявлено, что количество пены с использованием органического пенообразователя при смешивании с геополимерным вяжущим, требуется в большом объеме, а поры, из-за высокой вязкости пасты, как правило, разрушаются в процессе смешивания.

С точки зрения микроструктуры, разница между плотными и ячеистыми геополимерами также существенна. В целом, разработка геополимерного пенобетона является относительно новой областью строительного материаловедения, поскольку объем данных о взаимосвязи между составом, структурой и свойствами этих материалов незначителен [1].

Теоретический анализ литературы показывает, что проблема получения пористых геополимерных материалов рассматривается достаточно широко (табл. 1).

Следует отметить, что большое количество исследований также посвящены вопросу порообразования и формированию пористости в геополимерном бетоне [23, 33, 36], а также условиям твердения пористой вяжущей системы [25, 32, 44].

Таблица 1

Зарубежный опыт получения ячеистого геополимерного бетона

Сырье	Порообразователь	Активатор	Условия твердения	Источник
Зола-уноса	Na_2SiO_3	NaOH	СВЧ-нагрев при 100 °C	[25]
Перлит	H_2O_2	NaOH	2ч при 35 °C (пластик. форма) + 24ч при 65 °C	[44]
Зола-уноса + мета-каолин	Al-пудра	Na_2SiO_3	24 ч при 25 и 70 °C	[28]
Доменный шлак	Al-пудра (0,06 %) + лаурилсульфат натрия (0,04 %)	Na_2SiO_3	2ч при 25 °C, нагрев до 87 °C за 3ч, выдержка 6ч, охлаждение 3ч	[32]
Зола-уноса	Al-пудра (5 %)	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$	24ч при н.у. (пластик. форма) + 24ч при 60 °C	[23]
Зола-уноса	Al-пудра + Перекись водорода (H_2O_2)	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$	24ч при 60 °C, нагрев в 3ч до 1000 °C	[24]
Метакаолин	Al-пудра (0,20 %)	Фосфорная кислота	5ч при 80 °C	[27]
ПЦ – 516 кг/м ³ , отходы стекла – 129 кг/м ³ , микрокремнезем – 64 кг/м ³	Синтетический ПАВ	Вода – В/Ц=0,4 ПАВ, пластиф. Sika ViscoCrete D 132-2	24 ч при н.у. (полиэтилен. форма) + в воде при 20±2 °C и влажности 95%	[30]
Гранулы калия + Метакаолин	Na_2SiO_3 + микрокремнезем	$\text{KOH} + \text{K}_2\text{SiO}_3$	0,3ч при 70 °C + 1,5ч при 50 °C + 12ч при 25 °C	[33]
Металлургические отходы (шлак)	Гранулированные удобрения	Вода	24ч при н.у. + при 20±2 °C	[34]
Каолин (10 %) + Тальк (90 %)	Отходы технической резины	Вода	48ч (25 °C), нагрев (300 °C), спекание 900, 1220 °C	[36]
Зола рисовой шелухи и метакаолин (2,5:1)	Al-пудра	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$	24ч 20±2 °C + 48ч 30 °C	[31]

Пористость ячеистого геополимербетона.

В исследовании Sanjayan, J., Nazari, A. и других [23] изучены особенности формирования поровой структуры и ее влияния на свойства образцов ячеистого геополимербетона на основе золы-уноса и смеси щелочных компонентов « Na_2SiO_3 – NaOH ». В качестве порообразующего агента использовалась алюминиевая пудра. Благодаря активной химической реакции между алюминиевым порообразователем и щелочным активатором в геополимерной системе формируется преимущественно высокопористая структура. Анализ экспериментальных данных показал, что введение до 5 % алюминиевой пудры как порообразующего компонента при следующем соотношении сырьевых компонентов: щелочной активатор / зола-уноса – 0,3; Na_2SiO_3 / NaOH – 2,5, обеспечивает формирование наибольшей пористости и,

как следствие, наименьшей плотности наилучшего вспененного образца. При этом, показатели прочности на сжатие для всей линейки экспериментальных образцов ячеистого геополимера находились в пределах 0,9–4,35 МПа.

Однако авторами было отмечено, что высокая концентрация этого порообразователя инициирует чрезмерно интенсивное протекание реакции, что, в свою очередь, препятствует полной щелочной активации алюмосиликатной составляющей в геополимерной матрице и, следовательно, геополимеризация протекает частично.

В работе Henon J., Alzina A. и Rossignol S. [33] доказана возможность регулирования температурным воздействием таких параметров поровой геополимерной структуры как размер и морфология пор, а также степень их гомогенного

распределения в объеме ячеистой матрицы. Исследования проводились на образцах геополимерных пен, полученных путем смешения метакрилатов и микрокремнезема, активированных смесью из щелочных компонентов «силикат калия – гидроксид калия». Микрокремнезем был использован в геополимерной системе в качестве порообразующей добавки до 50 % от общей массы алюмосиликатной твердой фазы. Порообразующий эффект микрокремнеземной добавки заключается в том, что имеющиеся свободные атомы кремния в составе микрокремнезема окисляются под действием щелочного раствора, высвобождая молекулярный водород, который инициирует процесс порообразования и формирует поровую структуру. На основании проведенных исследований было установлено, что даже низкотемпературная обработка (в диапазоне 25–70 °С) способна инициировать эффективное порообразование. При этом, отмечено, что за счет циклического температурного воздействия возможно регулировать гранулометрию пор. В результате, синтезируемые таким образом геополимерные пены, характеризуются следующими теплофизическими характеристиками: размер пор – от 0,5 до 1,6 мм; коэффициент теплопроводности – от 0,12 Вт/м·К при пористости структуры 65–85 % и средней плотности 0,4–0,85 г/см³.

Исследованиями [25] рассмотрена гипотеза и доказана возможность обеспечения поровой структуры геополимера, а также регулирования степени ее пористости без введения дополнительных порообразующих агентов, с применением только алюмосиликатной матрицы и щелочного активатора. Для формирования поровой структуры изготавливаются шарообразные агрегаты, состоящие из силиката натрия и золы-уноса, которые под действием микроволнового излучения при температуре 220 °С в микроволновой печи претерпевают одновременное вспучивание и процесс геополимеризации с последующим спеканием агрегатов в ячеистый монолит.

Российскими исследователями Богомазовой Е.В., Калининченкой В.В., Костюковым Н.С. и другими [36] предложен метод синтеза пористой керамики, как ближайшего аналога геополимерных систем, на основе каолина, талька и кварц-полевошпатового сырья, где в качестве порообразующей добавки авторами были рассмотрены отходы резиномеханического производства, зерновых культур и деревообработки. Метод поризации в данном случае заключается в формовании образцов путем прессования сырьевой смеси под давлением 3 МПа, с последующей сушкой при комнатной температуре и влажности в течение 48 часов и дальнейшим обжигом в муфельной печи в

температурном диапазоне от 330 до 1220 °С. Обожженные образцы охлаждались в печи до комнатной температуры. Таким образом, формирование поровой структуры данным методом осуществляется за счет выгорания органического наполнителя в процессе обжига геополимерных образцов.

Недостатком данного метода является наличие усадки получаемых ячеистых композитов, которая составляет 20 % – в образцах с зерновыми отходами, 14 % – с резиновой крошкой и 5 % – с отходами деревообработки.

Авторами Kioupis, D., Skaropoulou A. и другими в работе [45] поровая структура ячеистых геополимеров обеспечивалась за счет введения в вяжущую матрицу заранее пористого наполнителя в виде вспененного полистирола и вспученного перлита. Однако результаты исследований показали, что введение в состав геополимерной матрицы выбранных легких наполнителей приводит к снижению прочности на сжатие и изгиб для геополимерных образцов на 77 и 35 %, соответственно. Тем не менее, подобный состав и способ поризации структуры позволил авторам синтезировать легковесные геополимерные композиты с плотностью в диапазоне 1,0–1,6 г/см³, прочностью на сжатие 10–33 МПа, на изгиб 1,8–6,3 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,29–0,42 Вт/м·К, а также сорбционной способностью 0,031–0,056 мм/ч.

Ouda S. A., Rashad L. A. [46] использовали легкий керамзитовый щебень в качестве пористого наполнителя в ячеистый геополимербетон, где в качестве связующей матрицы использовался металлургический шлак, активированный раствором силиката натрия.

Легкий керамзитобетон представляет собой искусственный наполнитель, полученный в результате вспучивания глины и ее увеличения таким образом в объеме до 6 раз в процессе ее обжига при температуре около 1150 °С во вращающейся печи. Однако в результате исследований авторами было выявлено, что использование керамзитобетона в геополимерной системе в качестве наполнителя оказывает негативное влияние на показатели компрессионной прочности и водопоглощения. Но, при этом был отмечен положительный эффект данного наполнителя на теплопроводность, удобоукладываемость и относительную прочность после повышенного температурного воздействия.

Ранее автором статьи [47] было изучено влияние порообразователей различной природы на эффективность формирования поровой структуры в геополимерной высокощелочной среде. Экспериментальные результаты показали, что

синтетический пенообразователь в высокощелочной среде не способен формировать высокопористую структуру, в то время как применение порообразователя белкового происхождения работает более эффективно (с обеспечением кратности пены до 10).

Условия твердения.

В работе коллектива авторов [24] предложена методика отверждения геополимерного вяжущего следующего компонентного состава: зола-уноса – в качестве основного алюмосиликатного компонента, активированная смесь из гидроксида натрия и силиката натрия, используемых как щелочные компоненты. В качестве порообразующего агента в данной работе применялась смесь из алюминиевой пудры и перекиси водорода (H_2O_2). Предложенная методика предусматривает синтез ячеистого геополимера в следующей последовательности: в полученную после равномерного смешения компонентов, геополимерную суспензию вводилась смесь из порообразующих агентов. Далее, полученная суспензия была заформована в металлические формы. Дальнейшее твердение образцов осуществлялось по следующему температурному режиму: выдержка в естественных лабораторных условиях в течение нескольких часов → выдержка в сушильном шкафу при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24 часов → расформовка и охлаждение образцов до естественной температуры → прокаливание в муфельной печи в течение 3 часов до температур в диапазоне от $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью нагрева $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ → охлаждение образцов в муфельной печи до естественной температуры со скоростью охлаждения $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Результаты испытаний образцов показали, что высокотемпературное воздействие способствует увеличению

прочности пористых геополимеров примерно в два раза (до 42 МПа).

В работе итальянских исследователей Ul Haq, E. and Licciulli, A. [25] из университета Саленто применяется микроволновый синтез для вспенивания геополимерной массы с использованием золы-уноса и компонентов силиката натрия и гидроксида натрия – в качестве щелочных активизирующих агентов. Изменяя содержание соотношения золы-уноса и щелочного активатора (преимущественно, силиката натрия), можно моделировать физические и механические свойства теплоизоляционных кирпичей. Микроволновый синтез позволяет получать пенобетон с низкой плотностью (до $610\text{ кг}/\text{м}^3$) и теплопроводностью ($\approx 0,075\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), а также высокой пористостью и прочностью на сжатие – 72% и $3,55\text{ МПа}$, соответственно.

Как показывают данные литературных источников, опыт применения ячеистых геополимербетонных конструкций на сегодняшний день не ограничивается только научными исследованиями, но и имеет примеры эффективного применения в строительной практике.

Так, в Австралии в 2013 году при университете Квинсленда был построен Научно-исследовательский Институт Глобальных Изменений (GCI), который является первым зданием в мире, где успешно были применены материалы и конструкции из ячеистого геополимербетона (рис. 5) [48]. Институт Глобальных Изменений Квинсленда представляет собой четырехэтажное здание, полы которого изготовлены из конструкционного геополимерного бетона. Плиты состоят из геополимерной матрицы на основе шлака и золы-уноса.



Рис. 5. Первое здание из геополимербетона на основе золы-уноса, Университет Квинсленда, Австралия

Для этого здания Австралийская строительная компания HySSIL разработала сборные ячеистые геополимерные панели также на основе золы-уноса и доменного шлака, которые вполнину легче обычных цементобетонных панелей, с аналогичной прочностью и долговечностью (рис. 6).

Технические характеристики панелей HySSIL подходят для широкого спектра областей применения, включая использование в модульных конструкциях малоэтажного жилья [49].

Пористая геополимерная панель имеет ряд преимуществ по сравнению с панелью HySSIL на основе цемента, таких как:

- предел прочности при сжатии и изгибе на 15 % выше, чем у панелей на основе цемента, при плотностях от 1000 кг/м³ и 1500 кг/м³;
- более быстрое время твердения, позволяющее повторно использовать опалубку и сократить производственные затраты;
- более высокая химическая резистивность и огнестойкость;

– энергетические затраты на производство ниже примерно на 60 %.

Нельзя не отметить интерес к ячеистому геополимерному бетону и в других развитых странах. Так в 2014 году в США получен патент US20140264140A1 [51] на высокопрочный композиционный геополимерный пористый бетон. Бетон проектировался на основе низкокальциевой золы-уноса или золы-уноса класса F (содержание оксида CaO менее 20 %, согласно ASTM C618-19 [50]) и имел прочность на сжатие от 3 до 17 МПа при соответствующей средней плотности от 400 до 1200 кг/м³ (рис. 7). Необходимо отметить комплексный состав этого ячеистого бетона, включающий различные добавки, суперпластификаторы, модификаторы, а также легкие наполнители. Для порообразования использовалось сочетание алюминиевой пудры и перекиси водорода H₂O₂. Данный материал может быть применен как конструкционный, так и теплоизоляционный.



Рис. 6. Сборная панель строительной компании HySSIL из геополимерного ячеистого бетона на основе золы-уноса и шлака [49]

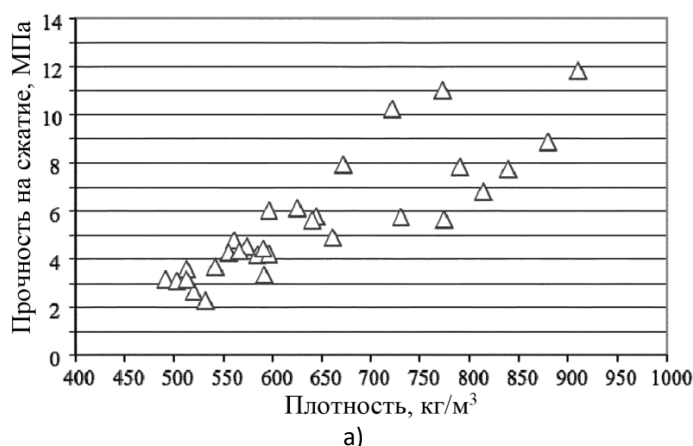


Рис. 7. Композиционный геополимерный пористый бетон:
а) – показатели прочности на сжатие и плотности материала,
б) – внешний вид образцов ячеистого геополимербетона [51]

Кроме того, ячеистые геополимерные материалы нашли широкое практическое применение для фильтрации, очистки, создания акустических материалов и конструкций линий электропередач. Как правило, такие геополимеры изготавливаются спеканием при 1000 °С [52, 53].

В последнее время ячеистый геополимер также расширил области своего применения благодаря низкой стоимости, простоты технологии производства, кислотостойкости, высоким теплотехническим свойствам и экологичности [27].

Вывод. Таким образом, обзорный анализ показал, что ячеистый геополимербетон является строительным материалом, имеющим большой рынок сбыта. Фактором, определяющим область его применения и востребованность, является низкая плотность и, как следствие, высокие теплотехнические характеристики при достаточной прочности и высокой эксплуатационной экологичности (в отличие от материалов на полимерной основе, таких как пенополистирол). Замена цемента на геополимерное вяжущее при обеспечении достаточной экономичности и повышении экологичности производства путем использования вяжущего аtermального синтеза, позволит расширить спектр применяемого сырья и укрепить позиции ячеистого бетона как современного энергоэффективного строительного материала.

Однако, несмотря на проведенный широкий спектр исследований по разным аспектам, касающимся производства ячеистых геополимеров, применение этих материалов в настоящий момент не является широко распространенным по техническим и другим причинам.

Анализируя проблемы, связанные с производством ячеистого геополимерного бетона, нельзя не подчеркнуть, что отсутствие глубокого понимания представлений о фазовых и микроструктурных особенностях в ячеистой геополимерной структуре является ключевым фактором, определяющим такие технологические факторы производственного процесса как, выбор и подготовка сырья с учетом его химической природы и микроструктуры системы; последовательность введения компонентов; условия и режим твердения; а также контроль технологических свойств, которые способствуют усовершенствованию и эффективному применению геополимерных материалов. Поскольку в настоящее время в литературе отсутствует достаточное количество информации, обеспечивающей глубокое понимание формирования и особенностей поровой структуры в геополимерных системах, проведение исследований в данном направлении является весьма актуальным и требует более глубокого изучения.

Источник финансирования. Исследования выполнены в рамках реализации нацпроекта «Наука и университеты», научная тема «Создание лаборатории качества среды обитания человека и энергоэффективности городского хозяйства (FZRR-2022-0007)», рег. номер 1022072100016-6-2.1.3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhang Z., Provis J., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
2. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 20–24.
3. Ishizaki K., Komarneni S., Nauko M. *Porous Materials: Process Technology and Applications*. London: Kluwer. 1998. 240 p.
4. Luyten J., Mullens S., Snijders F., Buekenhoudt A. Global Roadmap for Ceramics-ICC2 // *Proceedings, ISTECCNR. PoreArchitecture for a Vast Range of Applications*. Verona. 2008. Pp. 309–316.
5. Innocentini M.D.M., Sepulveda P., Salvini V.R., Pandolfelli V.C., Coury J.R. Permeability and structure of cellular ceramics: a comparison between two preparation techniques // *Journal of the American Ceramic Society*. 2005. Vol. 81(12). Pp. 3349–3352. doi: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02782.x.
6. Bourret E., Prud'homme S., Rossignol D., Smith S. Thermal conductivity of geomaterial foams based on silica fume // *Journal of Materials Science*. 2012. Vol. 47. Pp. 391–396. doi: 10.1007/s10853-011-5810-3.
7. Smith D.S., Poulier C., Nait-Ali B., Michot A., Absi J. Influence of grain–grain interfaces on heat transfer in dense and porous oxide ceramics // *Ceramic Transactions*. 2007. Vol. 198 (27). doi: 10.1002/9781118144145.ch5.
8. Nait-Ali B., Haberkorn K., Vesteghem H., Absi J., Smith D.S. Preparation and thermal conductivity characterization of highly porous ceramics. Comparison between experimental results, analytical calculations and numerical simulations // *Journal of European Ceramic Society* 2007. Vol. 27(2–3). Pp. 1345–1350. doi: 10.1016/j.jeurceram-soc.2006.04.025.
9. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W. et al. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash // *Journal of Hazardous Materials* 2010. 174. Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.
10. Aguilar R.A., Díaz O.B., García J.I.E. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash

- binders, with blast furnace slag aggregates // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.
11. Al Bakri Abdullah M.M., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Yahya Z., Razak R.A. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent // *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13 (6). Pp. 7186–7198. doi: 10.3390/ijms13067186.
12. Van Deventer J., Provis J., Duxson P., Brice D. Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials // *Waste and Biomass Valorization*. 2010. Vol. 1(1). Pp.145–155. doi: 10.1007/s12649-010-9015-9.
13. Van Deventer J., Provis J. and Duxson P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement // *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 29. Pp. 89–104. doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.009.
14. Ji Z., Pei Y. Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: A review // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 231. Pp. 256–267. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.041.
15. Кривенко П.В., Скурчинская Ж.В., Бродко О.А., Желудков Г.В. Щелочные алюмосиликатные полимеры // *Материалы для строительных конструкций. ICMB'94: Тез. докл. III междунар. научн. конф. Днепропетровск*. 1994. С. 13.
16. Patent 4,349,386, US. Mineral polymers and methods of making them / Davidovits J.; 1982.
17. Rovnaník P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp.1176–1183. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.023.
18. Zhang Z., Wang H., Provis J., Bullen F., Reid A. and Zhu Y. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide // *Thermochimica Acta*. 2012. Vol. 539. Pp. 23–33. doi: 10.1016/j.tca.2012.03.021.
19. Кожухова Н.И., Жерновский И.В. Геополмерное вяжущее и бетон на основе зол-уноса ТЭС. Монография. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2015. 183 с.
20. Davidovits J. 30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. Geopolymer 2002: Turn Potential Into Profit, Melbourne, Australia: Siloxo Proceedings. Lukey. 2002.
21. Fletcher R.A., Mac Kenzie K.J.D., Nicholson C.L., Shimada S. The composition range of aluminosilicate geopolymers // *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. Vol. 25(9). Pp. 1471–1477. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001.
22. Мирошников Е.В., Строкова В.В., Череватова А.В., Павленко Н.В. Наноструктурированное перлитовое вяжущее и пенобетон на его основе // *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 105–106.
23. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.
24. Abdullah M., Jamaludin L., Hussin K., Bnhussain M., Ghazali C., Ahmad M. Fly Ash Porous Material using Geopolymerization Process for High Temperature Exposure // *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13(12). Pp. 4388–4395. doi: 10.3390/ijms13044388.
25. Ul Haq E., Licciulli A. Microwave synthesis of thermal insulating foams from coal derived bottom ash // *Fuel Processing Technology*. 2015. Vol. 130. Pp. 263–267. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.10.017.
26. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.
27. Leping L., Xuemin C., Shuheng Q., Jun-li Y. and Lin Z. Preparation of phosphoric acid-based porous geopolymers // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(4). Pp. 600–603. doi: 10.1016/j.clay.2010.10.004.
28. Arellano Aguilar R., Burciaga Díaz O. and Escalante García J. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.
29. Patent 102584323, CN. Geopolymeric light porous material and preparation method thereof / Cui X.; 2012.
30. Kara P., Shishkin A., Korjamins A. Eco cellular concrete // *International Symposium on Sustainability Eco-Crete 2014*. Reykjavik: ICE Rheo-center. 2014. Pp. 37–42.
31. Kamseu E., Zénabou N. M. Ngouloure, Benoît Nait Ali, Zekeng S., Melo U. C., Rossignol S., Leonelli C. Cumulative pore volume, pore size distribution and phases percolation in porous inorganic polymer composites: Relation microstructure and effective thermal conductivity // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.11.066.
32. Esmaily H., Nuranian H. Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag // *Construction and Building Materials*.

2012. Vol. 26(1). Pp. 200–206. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.010.

33. Henon J., Alzina A., Rossignol S. Potassium geopolymer foams made with silica fume pore forming agent for thermal insulation // *Journal of Porous Materials*. 2012. Vol. 20(1). Pp. 37–46. doi: 10.1007/s10934-012-9572-3.

34. Lee B., Jang Y., Kim, Y. Engineering Performance and Applicability of Environmental Friendly Porous Concrete for a Marine Ranch Using Steel Industry By-products // *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2013. Vol. 25(1). Pp. 115–123. doi: 10.4334/JKCI.2013.25.1.115.

35. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W., Ning G. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 174(1-3). Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.

36. Bogomazova E., Kalinichenko B., Kostyukov N., Shchekina G., Makeeva T. Production of porous aluminosilicate ceramic using industrial wastes // *Glass and Ceramics*. 2011. Vol. 68(7-8). Pp. 224–226. doi: 10.1007/s10717-011-9358-0.

37. Hernández-Zaragoza J., López-Lara T., Horta-Rangel J., López-Cajún C., Rojas-González E., García-Rodríguez F., Adué J. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. Pp. 1–5. doi: 10.1155/2013/160162.

38. Kamseu E., Nait-Ali B., Bignozzi M., Leonelli C., Rossignol S., Smith D. Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements // *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. Vol. 32(8). Pp. 1593–1603. doi: 10.1016/j.jeurceram-soc.2011.12.030.

39. Zhang Z., Wang H., Reid A., Aravinthan T. Effects of fly ash source and curing procedure on strength development of geopolymers // *Incorporating sustainable practice in mechanics of structures and materials: ACMSM 21*. Melbourne: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2010. doi: 10.1201/b10571-155.

40. Hajimohammadi A., Provis J., van Deventer J. Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation // *Chemistry of Materials*. 2010. Vol. 22(18). Pp. 5199–5208. doi: 10.1021/cm101151n.

41. Aydın S., Baradan B. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars // *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37(6). Pp. 988–995. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.005.

42. Buchwald A., Oesterheld R., Hilbig H. Incorporation of Aluminate into Silicate Gels and its

Effect on the Foamability and Water Resistance // *Journal of the American Ceramic Society*. 2010. Vol. 93(10). Pp. 3370–3376. doi: 10.1111/j.1551-2916.2010.03842.x.

43. Laukaitis A., Žurauskas R., Kerien J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties // *Cement and Concrete Composites*. 2005. Vol. 27. (1). Pp. 41–47. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004.

44. Vaou V., Panias D. Thermal insulating foamy geopolymers from perlite // *Minerals Engineering*. 2010. Vol. 23(14). Pp. 1146–1151. doi: 10.1016/j.mineng.2010.07.015.

45. Kioupis D., Skaropoulou A., Tsivilis S., Kakali G. Properties and durability performance of lightweight fly ash based geopolymer composites incorporating expanded polystyrene and expanded perlite // *Ceramics*. 2022. Vol. 5. Pp. 821–836. doi: 10.3390/ceramics5040060.

46. Ouda S. A., Rashad L. A. An investigation on the performance of lightweight mortar-based geopolymer containing high-volume LECA aggregate against high temperatures // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Pp. 26631–26647. doi: 10.1007/s11356-021-17819-2.

47. Кожухова Н.И., Данакин Д.Н., Кожухова М.И., Алфимова Н.И., Чепурных А.А. pH-показатель среды как фактор формирования поровой структуры пен // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. №8. С. 101–108. doi: 10.12737/article_5b6d586ca043d4.17885788.

48. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 5th ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute. 2011. 680 p.

49. Hyssil.com, Geopolymer Cellular Precast Panel. (2014). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hyssil.com/geopolymercellularprecastpanel/> (дата обращения: 4.02.2023).

50. ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw and Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 2019.

51. Patent 20140264140 A1, US. High-strength geopolymer composite cellular concrete / Gong W.; 2014.

52. Madhavi S., Ferraris C., White T.J. Synthesis and crystallization of macroporous hydroxyapatite // *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 178. Pp. 2838–2845. doi: 10.1016/j.jssc.2005.06.039.

53. Buchwald A., Vicent M., Krieger R. et al. Geopolymeric binders with different fine fillers-phase transformations at high temperature // *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 46. Pp. 190–195. doi: 10.1016/j.clay.2009.08.002.

Информация об авторах

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.02.2023 г.

© Кожухова Н.И., 2023

Kozhukhova N.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Moscow Polytechnic University

E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

BACKGROUND OF GEOPOLYMER-BASED CELLULAR CONCRETE PRODUCTION

Abstract. Geopolymer systems are currently quite promising among scientists in the field of building materials science in terms of energy-saving free of cement binders and athermal synthesis materials due to a wide list of their positive properties that compete well with traditional analogs such as cement and cement concrete. The article provides a literary review of the current research and practical experience among Russian and foreign scientists on the issue of the synthesis of cellular concrete based on geopolymer. Based on a review analysis of modern publications in this field over the past 20-25 years, it has been shown that the key parameters that dominate the formation of a high-quality pore structure, as well as the thermophysical and mechanical properties of cellular geopolymer concrete are the following: choice and preparation of the main raw material, taking into account its chemical the nature and microstructure of the system, the type of modifying and pore-forming component, the sequence of introduction of components, the conditions and mode of hardening, the technology of pore formation, etc. As a result of analytical research, it was also revealed that, despite the rather large number of works devoted to obtaining cellular geopolymer systems, in general, today there is no deep understanding of the principles of formation and behavior of the pore structure during the operational period in geopolymer systems.

Keywords: geopolymer, cellular concrete, porous structure, synthesis methods, performance properties.

REFERENCES

1. Zhang Z., Provis J., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.
2. Slavcheva G.S., Chernyshov E.M., Novikov M.V. Thermal efficient foam concretes of a new generation for low-rise construction [Teploeffektivnyye penobetony novogo pokoleniya dlya maloetazhnogo stroitel'stva]. *Stroitel'nye Materialy*. 2017. No. 7. Pp. 20–24. (rus)
3. Ishizaki K., Komarneni S., Nauko M. *Porous Materials: Process Technology and Applications*. London: Kluwer. 1998. 240 p.
4. Luyten J., Mullens S., Snijders F., Buekenhoudt A. Global Roadmap for Ceramics-ICC2. Proceedings, ISTE-CNR. *PoreArchitecture for a Vast Range of Applications*. Verona. 2008. Pp. 309–316.
5. Innocentini M.D.M., Sepulveda P., Salvini V.R., Pandolfelli V.C., Coury J.R. Permeability and structure of cellular ceramics: a comparison between two preparation techniques. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998. Vol. 81(12). No. 3349. doi: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02782.x.
6. Bourret E., Prud'homme S., Rossignol D., Smith S. Thermal conductivity of geomaterial foams based on silica fume. *Journal of Material Science*. 2012. Vol. 47. Pp. 391–396. doi: 10.1007/s10853-011-5810-3.
7. Smith D.S., Poulier C., Nait-Ali B., Michot A., Absi J. Influence of grain–grain interfaces on heat transfer in dense and porous oxide ceramics. *Ceramic Transactions*. 2007. Vol. 198 (27). doi: 10.1002/9781118144145.ch5.
8. Nait-Ali B., Haberko K., Vesteghem H., Absi J., Smith D.S. Preparation and thermal conductivity characterization of highly porous ceramics. Comparison between experimental results, analytical calculations and numerical simulations. *Journal of European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27(2–3). No. 1345. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.025.
9. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W. et al. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. 174. Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.
10. Aguilar R.A., Díaz O.B., García J.I.E. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.
11. Al Bakri Abdullah M.M., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Yahya Z., Razak R.A. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete us-

ing foaming agent. *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13 (6). Pp. 7186–7198. doi: 10.3390/ijms13067186.

12. Van Deventer J., Provis J., Duxson P., Brice D. Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials. *Waste and Biomass Valorization*. 2010. Vol. 1(1). Pp. 145–155. doi: 10.1007/s12649-010-9015-9.

13. Van Deventer J., Provis J. and Duxson P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 29. Pp. 89–104. doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.009.

14. Ji Z., Pei Y. Bibliographic and visualized analysis of geopolymer research and its application in heavy metal immobilization: A review. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 231. Pp. 256–267. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.10.041.

15. Krivenko P.V., Skurchinskaya Zh.V., Brodtko O.A., Zheludkov G.V. Alkaline aluminosilicate polymers. Materials for building structures [Shchelochnyye alyumosilikatnyye polimery. Materialy dlya stroitel'nykh konstruktsey]. ICMB'94: Abstracts of the III International Scientific Conference. Dnepropetrovsk. 1994, p. 13. (rus)

16. Patent 4,349,386, US. Mineral polymers and methods of making them / Davidovits J.; 1982.

17. Rovnaník P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp. 1176–1183. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.023.

18. Zhang Z., Wang H., Provis J., Bullen F., Reid A. and Zhu Y. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide. *Thermochimica Acta*. 2012. Vol. 539. Pp. 23–33. doi: 10.1016/j.tca.2012.03.021.

19. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V. Geopolymer binder and concrete based on TPP fly ash [Geopolimernoye vyazhushcheye i beton na osnove zolunosa TES]. Monograph. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2015. 183 p. (In Russian)

20. Davidovits J. 30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. *Geopolymer 2002: Turn Potential Into Profit*, Melbourne, Australia: Siloxo Proceedings. Lukey. 2002.

21. Fletcher R.A., Mac Kenzie K.J.D., Nicholson C.L., Shimada S. The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of European Ceramic Society*. 2005. Vol. 25(9). Pp. 1471–1477. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001.

22. Miroshnikov E.V., Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V. Nanostructured perlite

binder and foam concrete based on it [Nanostrukturovannoye perlitovoye vyazhushcheye i penobeton na yego osnove]. *Stroitel'nyye materialy*. 2010. No. 9. Pp. 105–106. (rus).

23. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.

24. Abdullah M., Jamaludin L., Hussin K., Bnhussain M., Ghazali C., Ahmad M. Fly Ash Porous Material using Geopolymerization Process for High Temperature Exposure. *International Journal of Molecular Sciences*. 2012. Vol. 13(12). Pp. 4388–4395. doi: 10.3390/ijms13044388.

25. Ul Haq E., Licciulli A. Microwave synthesis of thermal insulating foams from coal derived bottom ash. *Fuel Processing Technology*. 2015. Vol. 130. Pp. 263–267. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.10.017.

26. Sanjayan J., Nazari A., Chen L., Nguyen G. Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 79. Pp. 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.043.

27. Leping L., Xuemin C., Shuheng Q., Jun-li Y. and Lin Z. Preparation of phosphoric acid-based porous geopolymers. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(4). Pp. 600–603. doi: 10.1016/j.clay.2010.10.004.

28. Arellano Aguilar R., Burciaga Díaz O., Escalante García J. Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24(7). Pp. 1166–1175. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024.

29. Patent 102584323, CN. Geopolymeric light porous material and preparation method thereof / Cui X.; 2012.

30. Kara P., Shishkin A., Korjakin A. Eco cellular concrete. *International Symposium on Sustainability Eco-Crete 2014*. Reykjavik: ICE Rheocenter. 2014. Pp. 37–42.

31. Kamseu E., Zénabou N. M. Ngouloure, Benoît Nait Ali, Zekeng S., Melo U. C., Rossignol S., Leonelli C. Cumulative pore volume, pore size distribution and phases percolation in porous inorganic polymer composites: Relation microstructure and effective thermal conductivity. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 88. Pp. 45–56. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.11.066.

32. Esmaily H., Nuranian H. Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26(1). Pp. 200–206. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.010.

33. Henon J., Alzina A., Rossignol S. Potassium geopolymer foams made with silica fume pore forming agent for thermal insulation. *Journal of Porous Materials*. 2012. Vol. 20(1). Pp. 37–46. doi: 10.1007/s10934-012-9572-3.
34. Lee B., Jang Y., Kim, Y. Engineering Performance and Applicability of Environmental Friendly Porous Concrete for a Marine Ranch Using Steel Industry By-products. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2013. Vol. 25(1). Pp. 115–123. doi: 10.4334/JKCI.2013.25.1.115.
35. Zhao Y., Ye J., Lu X., Liu M., Lin Y., Gong W., Ning G. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 174(1–3). Pp. 108–112. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.023.
36. Bogomazova E., Kalinichenko B., Kostyukov N., Shchekina G., Makeeva T. Production of porous aluminosilicate ceramic using industrial wastes. *Glass and Ceramics*. 2011. Vol. 68(7–8). Pp. 224–226. doi: 10.1007/s10717-011-9358-0.
37. Hernández-Zaragoza J., López-Lara T., Horta-Rangel J., López-Cajún C., Rojas-González E., García-Rodríguez F., Adué J. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013. Pp. 1–5. doi: 10.1155/2013/160162.
38. Kamseu E., Nait-Ali B., Bignozzi M., Leonelli C., Rossignol S., Smith D. Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. Vol. 32(8). Pp. 1593–1603. doi: 10.1016/j.jeurceram-soc.2011.12.030.
39. Zhang Z., Wang H., Reid A., Aravinthan T. Effects of fly ash source and curing procedure on strength development of geopolymers. *Incorporating sustainable practice in mechanics of structures and materials: ACMSM 21*. Melbourne: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2010. doi: 10.1201/b10571-155.
40. Hajimohammadi A., Provis J., van Deventer J. Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation. *Chemistry of Materials*. 2010. Vol. 22(18). Pp. 5199–5208. doi: 10.1021/cm101151n.
41. Aydın S., Baradan B. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37(6). Pp. 988–995. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.005.
42. Buchwald A., Oesterheld R., Hilbig H. Incorporation of Aluminate into Silicate Gels and its Effect on the Foamability and Water Resistance. *Journal of the American Ceramic Society*. 2010. Vol. 93(10). Pp. 3370–3376. doi: 10.1111/j.1551-2916.2010.03842.x.
43. Laukaitis A., Žurauskas R., Kerien J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites*. 2005. Vol. 27. (1). Pp. 41–47. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2003.09.004.
44. Vaou V., Panias D. Thermal insulating foamy geopolymers from perlite. *Minerals Engineering*. 2010. Vol. 23(14). Pp. 1146–1151. doi: 10.1016/j.mineng.2010.07.015.
45. Kioupis D., Skaropoulou A., Tsivilis S., Kakali G. Properties and durability performance of lightweight fly ash based geopolymer composites incorporating expanded polystyrene and expanded perlite. *Ceramics*. 2022. Vol. 5. Pp. 821–836. doi: 10.3390/ceramics5040060.
46. Ouda S. A., Rashad L. A. An investigation on the performance of lightweight mortar-based geopolymer containing high-volume LECA aggregate against high temperatures. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Pp. 26631–26647. doi: 10.1007/s11356-021-17819-2.
47. Kozhukhova N.I., Danakin D.N., Kozhukhova M.I., Alfimova N.I., Chepurnykh A.A. pH-value of reaction medium as a factor of foam structure formation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 8. Pp. 101–108. doi: 10.12737/article_5b6d586ca043d4.17885788.
48. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 5th ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute. 2011. 680 p.
49. Hyssil.com, Geopolymer Cellular Precast Panel. (2014). URL: <http://www.hyssil.com/geopolymercellularprecastpanel/> (date of treatment: 04.02.2023).
50. ASTM C618-19. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw and Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 2019.
51. Patent 20140264140, US. A1 High-strength geopolymer composite cellular concrete Gong W.; 2014.
52. Madhavi S., Ferraris C., White T.J. Synthesis and crystallization of macroporous hydroxyapatite. *Journal of Solid State Chemistry*. 2005. Vol. 178. Pp. 2838–2845. doi: 10.1016/j.jssc.2005.06.039.
53. Buchwald A., Vicent M., Kriegel R. et al. Geopolymeric binders with different fine fillers-phase transformations at high temperature. *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 46. Pp. 190–195. doi: 10.1016/j.clay.2009.08.002.

Information about the authors

Kozhukhova, Natalia I. PhD, Assistant Professor. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Received 06.02.2023

Для цитирования:

Кожухова Н.И. Опыт производства ячеистых бетонов на основе геополимерных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23

For citation:

Kozhukhova N.I. Background of geopolymer-based cellular concrete production. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-8-23

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33

Отман Азми С.А., *Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Вашиева С.В.*Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова***E-mail chernysheva56@rambler.ru*

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ С КОМПЛЕКСОМ МИНЕРАЛЬНЫХ И ОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК

Аннотация. Для динамично развивающейся отрасли малоэтажного строительства растет потребность в расширении спектра строительных материалов, в том числе быстротвердеющих видов вяжущих. Эффективными являются композиционные гипсовые вяжущие, включающие тщательно подобранную смесь гипсового вяжущего, портландцемента и активных минеральных добавок. Материалы на их основе достаточно быстро твердеют и набирают требуемую прочность. Повышение эксплуатационных характеристик данного вида вяжущих достигается при применении в комплексе минеральных и химических добавок, что способствует регулированию процессов их структурообразования и твердения, зависящих от активности компонентов, изменения водопотребности, а также пептизирующего, адсорбционного и воздухововлекающего действия химических добавок. В статье приведены результаты исследования влияния химических добавок – суперпластификаторов MAPF SU 84, MELFLUX 5581 F и замедлителя сроков схватывания Plast Retard PE – на физико-механические свойства затвердевшего композиционного гипсового вяжущего, включающего гипсовое вяжущее, портландцемент и комплекс минеральных компонентов (тонкодисперсный кварцевый песок, метакаолин ВМК-45, известняковую пыль), рассмотрены вопросы управления процессами его структурообразования. Установлено, что тонкодисперсные минеральные добавки из кварцевого песка, метакаолина ВМК-45 и известняковой пыли являются эффективными компонентами для получения композиционных гипсовых вяжущих. Разработанные комплексные химические добавки MAPFSU 84 (0,1 %) + Plast Retard PE (0,08 %) и MELFLUX 5581 F (0,1 %) + Plast Retard PE (0,08 %) позволяют значительно замедлить начало и конец схватывания гипсоцементных смесей до 45...48 мин и увеличить предел прочности при сжатии затвердевшего КГВ через 28 суток в 1,5...1,6 раза (до 18,3...20,4 МПа), соответственно.

Ключевые слова: композиционное гипсовое вяжущее, минеральные добавки, химические добавки, свойства.

Введение. Важнейшей задачей строительной отрасли в настоящее время является энергосбережение, экология и создание комфортной среды обитания. Для достижения поставленной задачи необходимо использование высококачественных материалов различного назначения с ранее недостижимыми свойствами и разнообразной структурой на основе многокомпонентных вяжущих нового поколения.

Анализ научно-исследовательских работ [1–5] показывает, что одними из энергоэффективных и экологических строительных материалов, сочетающих в себе многофункциональность и сравнительно невысокую стоимость для широкого применения в разных сферах современного строительства, являются водостойкие композиционные гипсовые вяжущие (КГВ).

Для повышения эффективности КГВ авторами работ [6–10] предлагается использовать комплекс химических модификаторов (пластифицирующих добавок, регуляторов сроков схватывания и твердения, полимерных добавок) и активных кремнеземсодержащих компонентов из широкой гаммы сырьевых ресурсов.

Применение тонкодисперсных минеральных добавок в составе КГВ, растворных и бетонных

смесей на их основе, способствует улучшению их свойств (снижению расслаиваемости, усадки, объёмных деформаций и др.). Чем выше поверхностная энергия минеральных компонентов, тем выше их активность и эффективность [1, 11–15].

На основании анализа научных работ, связанных с разработкой водостойких КГВ [1–4], принята следующая научная концепция их создания. Получают композиционные гипсовые вяжущие (КГВ) в результате тщательного смешения активированных тонкодисперсных компонентов. Первый компонент – гипсовое вяжущее, регулирующее раннее схватывание и быстрый набор прочности. Следующие компоненты – портландцемент совместно с кремнеземсодержащими добавками оптимальной дисперсности, способствующие дальнейшему повышению прочности и водостойкости затвердевшего вяжущего. Третий компонент – модифицирующие добавки, которые позволяют снизить водопотребность КГВ, диспергировать образующиеся флоккулы зерен вяжущего, способствуя ускорению гидратации и регулированию других свойств в нужном направлении. Эти вяжущие обладают выраженными гидравлическими свойствами, прочность которых увеличивается при твердении во влажных

условиях и в воде. Изделия на их основе достаточно долговечны и, в большинстве случаев, не требуют тепловлажностной обработки.

При разработке устойчивых структур твердеющих КГВ важно учитывать [1, 16–19], что занимаемый объем образующегося в процессе гидратации этtringита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) значительно превышает суммарный объем исходных соединений, в результате чего может происходить их разрушение. С целью устранения деструктивных процессов в состав КГВ вводят активные минеральные добавки, способные снижать концентрацию $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в твердеющей гипсоцементной системе с образованием малорастворимых микро- и нанодисперсных новообразований. Их активность зависит от химического состава, наличия аморфного SiO_2 , от величины удельной поверхности и др. Рациональный подбор состава компонентов КГВ и их соотношения способствуют созданию достаточно плотной упаковки кристаллов новообразований, что, в совокупности с низкой водопотребностью гипсоцементной смеси, формирует бетон с высокой прочностью без перерасхода цемента как основного связующего компонента.

Целью исследования явилось изучение влияния комплекса химических добавок на физико-механические свойства и стабильность разработанного КГВ.

Материалы и методы. При исследовании физико-механических свойств КГВ с комплексом минеральных и химических добавок в качестве вяжущих веществ использовали две модификации гипсовых вяжущих – α - и β -модификацию, ЗАО «Самарский гипсовый комбинат», эффективность которых доказана авторским коллективом ранее [2–4], а также портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, «Новоросцемент» (ГОСТ 31108-2016). В качестве минеральных добавок применяли тонкодисперсный кварцевый песок (Палестина) и метакаолин ВМК-45, Челябинская обл. ТУ 5729-097-12615988-2013. В качестве наполнителя в составе КГВ – известняковую пыль (отсев дробления известняка), Палестина. В качестве химических модификаторов использовали суперпластификаторы марки MAPF SU 84 (ООО «АДДИТИВ ПЛЮС», г. Подольск Московской обл.) и Melflux 5581 F (BASF Construction Polimers GmbH, Германия); замедлитель сроков схватывания – Plast Retard PE (Италия).

Оценку физико-механических характеристик КГВ проводили согласно ГОСТ 23789-2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний».

Фазовый состав и микроструктуру проб, затвердевших КГВ, испытанных в возрасте 28 суток, осуществляли с помощью современных физико-химических методов анализа: растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU; рентгенофазового анализа и дифференциально-термического анализа, проводимого на дериватографе Q-1500-D.

Основная часть. В ранее проведенных исследованиях [7], в соответствии с требованиями ТУ 21-31-62-89 – Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, была установлена эффективность использования минеральных добавок в составе КГВ, включающем (% по массе) гипсовое вяжущее – 68 % (70 % – Г5БП и 30 % – ГВВС-16), портландцемент – 10 %, тонкодисперсные минеральные добавки (кварцевый песок – 20 %, метакаолин ВМК-45 – 0,5 %) и наполнитель (известняковую пыль – 1,5 %).

Эффективность использования химических добавок – суперпластификаторов поликарбоксилатного типа марки MAPF SU 84 и Melflux 5581 F, а также замедлителя сроков схватывания Plast Retard PE устанавливали по показателям физико-механических характеристик затвердевших вяжущих, которые моделируют условия их контакта с твердеющей матрицей и процессы между ними.

Химические добавки вводились в гипсоцементную смесь совместно с водой затворения. Были изготовлены образцы-кубы размером $3 \times 3 \times 3$ см, которые испытывали через 2 часа, 7 суток и 28 суток после изготовления.

В результате проведенных испытаний (табл. 1) было установлено, что совместное использование тонкодисперсных минеральных добавок и наполнителя позволило получить КГВ с пределом прочности при сжатии 12,3 МПа.

Эффективность использования суперпластификатора MAPF SU 84 (0,1–0,3 %) заключается в уменьшении В/Вяз отношения с 0,41 до 0,37...0,23 (с 10...44 %), соответственно, практически без изменения сроков схватывания, с повышением предела прочности при сжатии затвердевшего КГВ через:

- 2 часа с 6,9 МПа до 8,3...12,0 МПа (в 1,2...1,7 раза);
- 7 суток с 8,7 МПа до 15,0...26,4 МПа (в 1,7...3 раза);
- 28 суток с 12,3 МПа до 19,0...29,1 МПа (в 1,5...2,3 раза).

При использовании суперпластификатора MELFLUX 5581 F (0,1–0,3 %) происходит снижение В/Вяз отношения с 0,41 до 0,36...0,22 (на 13...46 %), соответственно, с незначительным сокращением сроков схватывания и повышением

предела прочности при сжатии затвердевшего КГВ через:

– 2 часа с 6,9 МПа до 8,5...12,9 МПа (в 1,2...1,8 раз);

– 7 суток с 8,7 МПа до 18,3...28,1 МПа (в 2,1 ...3,2 раза);

– 28 суток с 12,3 МПа до 23,0...31 МПа (в 1,8...2,5 раза).

Таблица 1

Влияние химических добавок на свойства КГВ (расплав 120 ±5 мм)

№ п/п	Вид добавки	Добавка, масс. %	В/Вяз	Сроки схват., мин-с		Рсж, МПа, через		
				начало	конец	2 ч	7 сут	28 сут
1	Без добавки	—	0,41	8–30	9–30	6,9	8,7	12,3
суперпластификаторы								
2	MAPF SU 84	0,1	0,37	8–00	9–00	8,3	15,0	19,2
3		0,2	0,30	8–00	9–00	9,2	19,2	23,0
4		0,3	0,23	7–00	8–00	12,0	26,4	29,1
5	MELFLUX 5581 F	0,1	0,36	8–30	9–30	8,5	18,3	23,0
6		0,2	0,29	8–00	9–00	10,0	24,2	26,0
7		0,3	0,22	7–30	8–30	12,9	28,1	31,0
замедлитель сроков схватывания								
8	Plast Retard PE	0,02	0,41	15–00	17–00	5,5	12,7	14,4
9		0,06	0,41	30–00	33–00	4,9	11,2	13,2
10		0,08	0,41	45–00	48–00	4,4	10,1	12,6
комплексные химические добавки								
11	MAPF SU 84 (0,1%)+ Plast Retard PE (0,08%)		0,39	46–00	48–00	7,2	14,6	18,3
12	MELFLUX 5581 F (0,1%)+ Plast Retard PE (0,08%)		0,38	45–00	47–00	8,1	15,7,	20,4

Использование замедлителя сроков схватывания Plast Retard PE (0,02–0,08 %) позволило замедлить начало схватывания с 8–30 мин до 15–00...45–00 мин, конец схватывания – с 9–30 мин до 17–00...48–00 мин с уменьшением предела прочности при сжатии затвердевших образцов вяжущего, испытанных через 2 часа. При дальнейшем твердении наблюдается повышение прочностных характеристик через:

- 7 суток с 8,7 МПа до 10,1...12,7 МПа;
- 28 суток с 12,3 МПа до 12,6...14,4 МПа.

Разработанные комплексные химические добавки MAPFSU 84 (0,1 %)+Plast Retard PE (0,08 %) и MELFLUX 5581 F (0,1 %)+Plast Retard PE (0,08 %) позволяют в более широких пределах замедлить начало и конец схватывания гипсоцементных смесей до 45–46 мин и 47–48 мин, соответственно, с увеличением предела прочности при сжатии затвердевшего КГВ через:

- 2 часа с 6,9 МПа до 7,2...8,1 МПа;
- 7 суток с 8,7 МПа до 14,6...15,7 МПа;
- 28 суток с 12,3 МПа до 18,3...20,4 МПа.

Более эффективной является комплексная добавка MELFLUX 5581 F (0,1 %)+Plast Retard PE (0,08 %), позволяющая увеличить конечную прочность затвердевшего КГВ на 66 % (20,4 МПа).

С целью подтверждения стабильности сформировавшихся структур затвердевшего

КГВ с комплексом минеральных и химических добавок (MELFLUX 5581 F (0,1 %)+Plast Retard PE (0,08 %)) методами РФА, ДТА и РЭМ [20] были проведены исследования фазового состава и микроструктуры (рис. 1–4).

С помощью РФА (рис. 1) выявлено, что в исследуемой пробе затвердевшего КГВ присутствует двуводный сульфат кальция ($d=4,27; 3,06; 2,87; 1,877... \text{\AA}$), карбонат кальция ($d=3,03; 2,49; 2,28; 2,09; 1,91... \text{\AA}$), очень слабой интенсивности $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,78... \text{\AA}$), низкоосновные гидроалюминаты кальция ($d=3,35; 2,29; 2,2... \text{\AA}$), кварц ($d=3,34... \text{\AA}$).

Рефлексы гидросиликата кальция типа $\text{CSH}(\text{B})$ ($d=3,07; 2,88; 2,80; 2,67; 2,52; 2,4; 2,205; 1,81... \text{\AA}$) на рентгенограмме перекрывают сильные линии отражения дигидрата сульфата кальция. Наличие достаточно широких дифракционных максимумов ($d=2,8; 3,1... \text{\AA}$) может свидетельствовать о наличии новообразованной рентгеноаморфной фазы, соответствующей гелеобразным низкоосновным гидросиликатам кальция, которые относятся к плохо закристаллизованным минералам переменного состава и не создают четких дифракционных отражений.

Эттринтит ($d=9,7; 5,6; 4,92; 4,74... \text{\AA}$) на рентгенограмме практически отсутствует, имеются лишь следы.

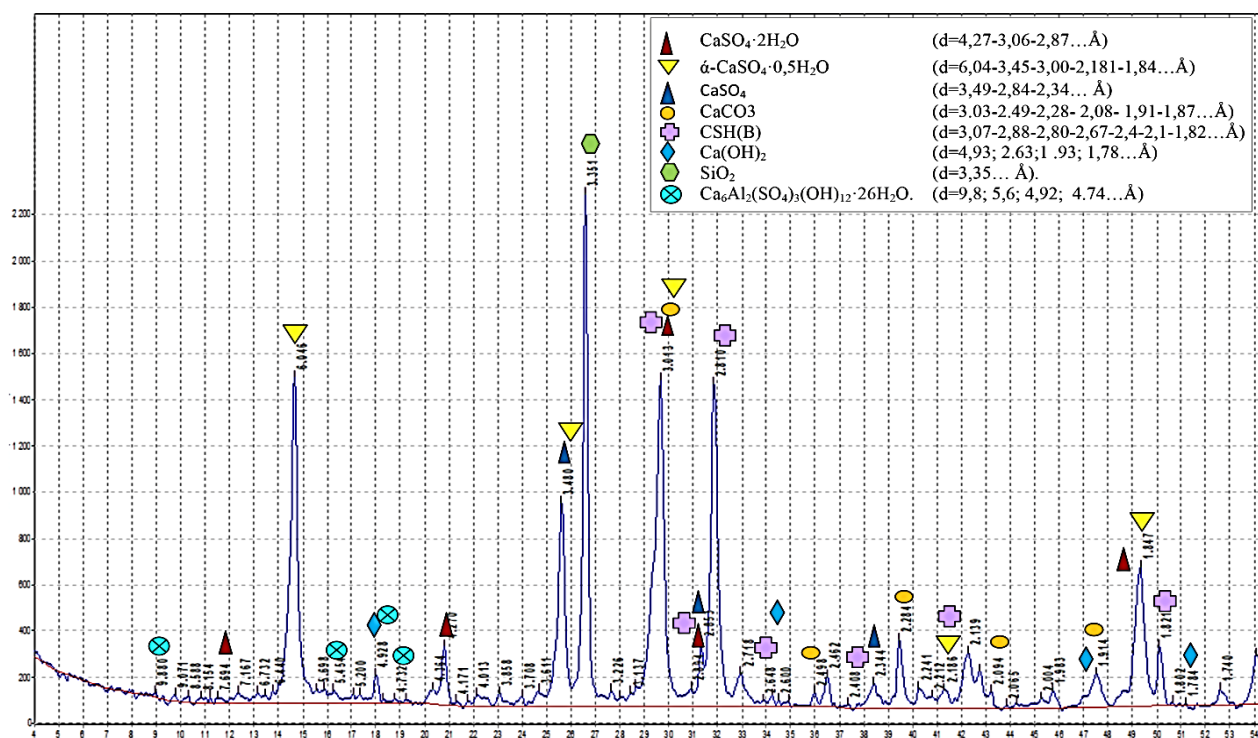


Рис. 1. РФА затвердевшего КГВ с комплексом минеральных и химических добавок

Данные рентгенофазового анализа полностью подтверждают результаты ДТА (рис. 2). Было установлено: на термограмме образца, затвердевшего КГВ имеются три эндотермических эффекта:

- при температуре 137,3 °С (связан с дегидратацией двухводного гипса до полуводного);

- при температуре 428,4 °С (связан с перестройкой кристаллической решетки при переходе растворимого ангидрита в нерастворимый);
- при температуре 574,8 °С (связан с полиморфным превращением кварца, а также, возможно, относится к дегидратации портландита).

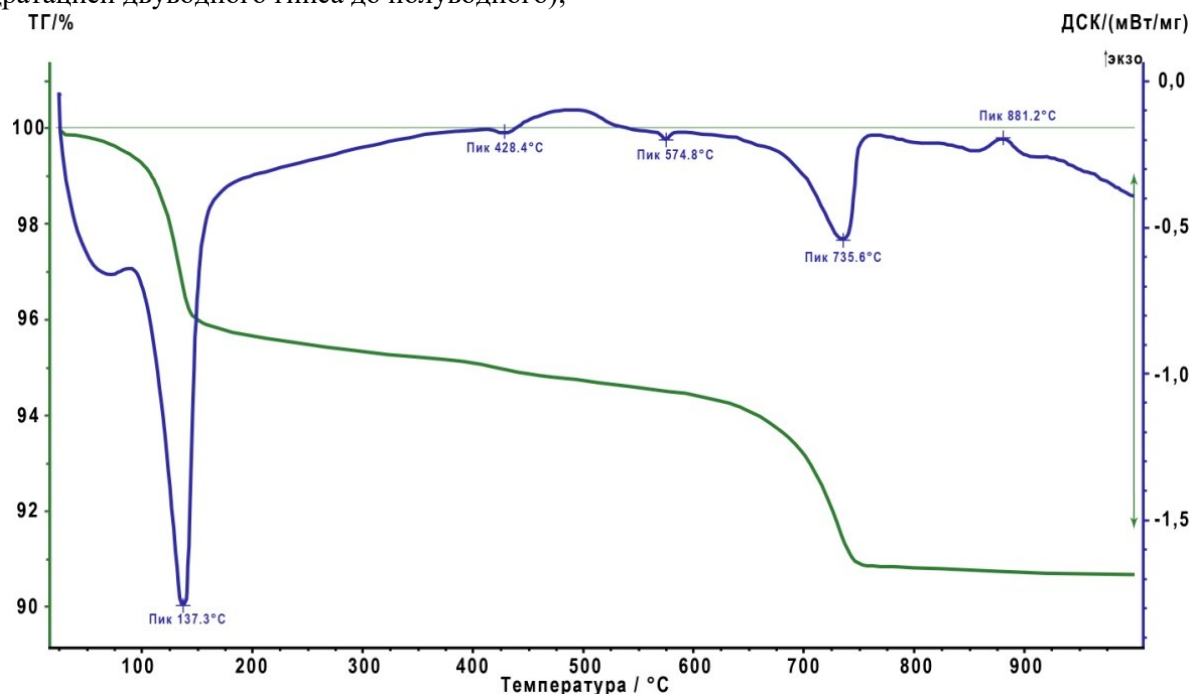
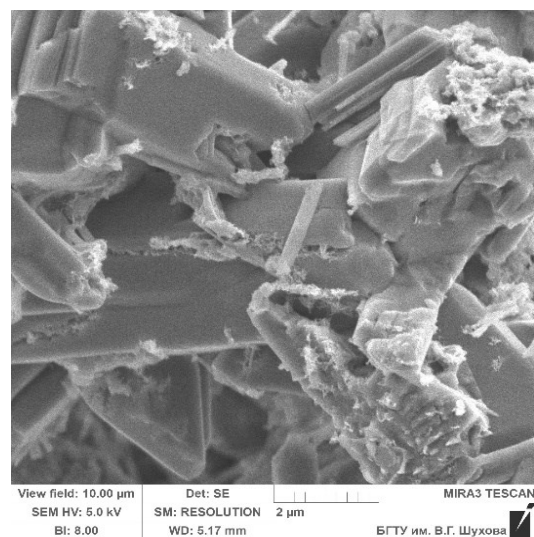
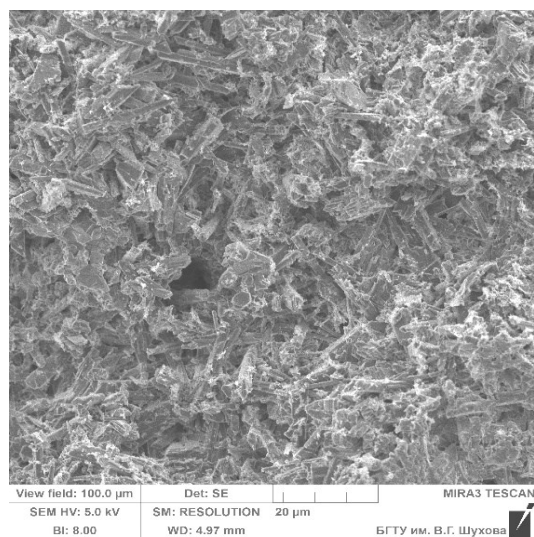


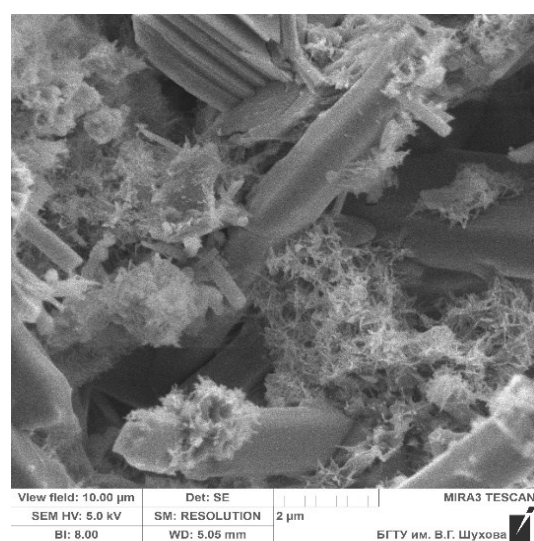
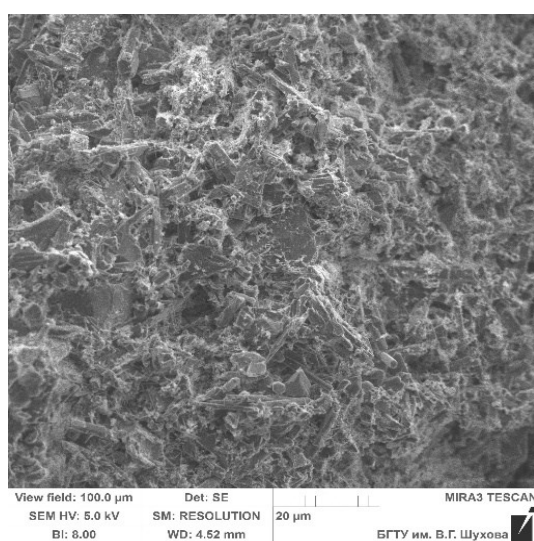
Рис. 2. ДТА затвердевшего КГВ с комплексом минеральных и химических добавок

Четвертый эндотермический эффект при температуре 735,6 °С, вероятно, обусловлен диссоциацией доломита – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, а также переходом α- и β-растворимого ангидрита в нерастворимый.

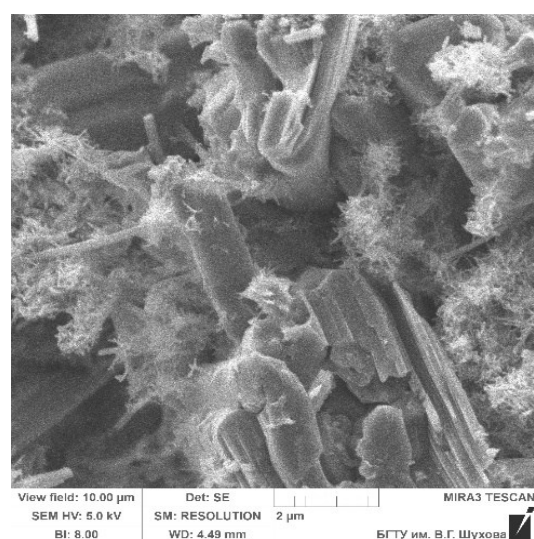
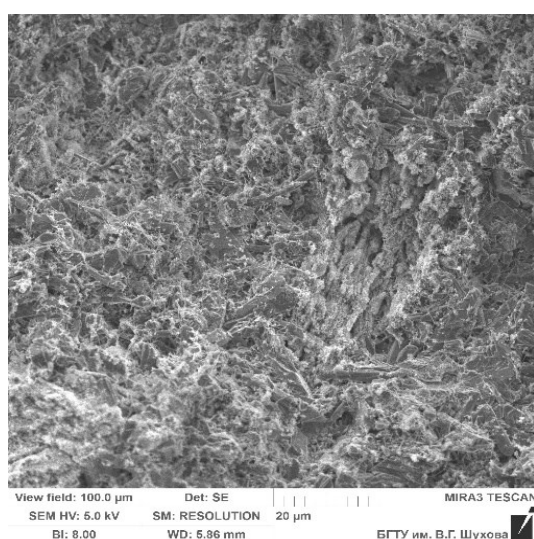
Экзотермический эффект в области 881,2 °С связан с разложением CSH(B) и нерастворимого ангидрита (на оксид кальция, сернистый газ и кислород), также возможно взаимодействие CaO с активными минеральными добавками.



а



б



в

Рис. 3. Микроструктура затвердевшего КГВ: а – 2 час; б – 7 сут; в – 28 сут

Используя растровый электронный микроскоп Tescan MIRA 3, была изучена микроструктура затвердевших образцов КГВ (рис. 3), анализ которой показал, что при совместном приме-

нии минеральных и органических добавок в составе вяжущего на ранней стадии гидратации (через 2 часа) в основном образуются призматические кристаллы двуhydrата, размер которых зависит от модификации сульфата кальция (рис. 3,

а). На снимках можно увидеть достаточно мелкие зародыши кристаллов β -полугидрата (размером около 0,2 мкм), а также относительно крупные кристаллы α -полугидрата (размером более 1,5...2 мкм), на формирование которых оказывают влияние химические добавки (суперпластификатор и замедлитель сроков схватывания), образуя на поверхности кристаллов тончайшие пленки, оказывающие замедляющее действие на их рост.

На снимках 7 суточных образцов (рис. 3, б) просматриваются микро- и наноразмерные новообразования низкоосновных гидросиликатов кальция (С-S-H-гель) и другие, которые уплотняют пустоты и поры между кристаллами гипса.

К 28 суткам (рис. 3, в) продолжается кристаллизация новообразований (в том числе низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации), что способствует дальнейшему уплотнению твердеющей гипсоцементной системы. Образуется непрерывная мелкокристаллическая структура с упрочненными связями между кристаллами, что способствует повышению физико-механических характеристик гипсоцементного камня.

Полученные характеристики микроструктуры образцов гипсоцементного камня были подтверждены результатами проведенного микроанализа. Спектры 1–13 характеризуют состав в конкретной точке микрозондирования (рис. 4, табл. 2).

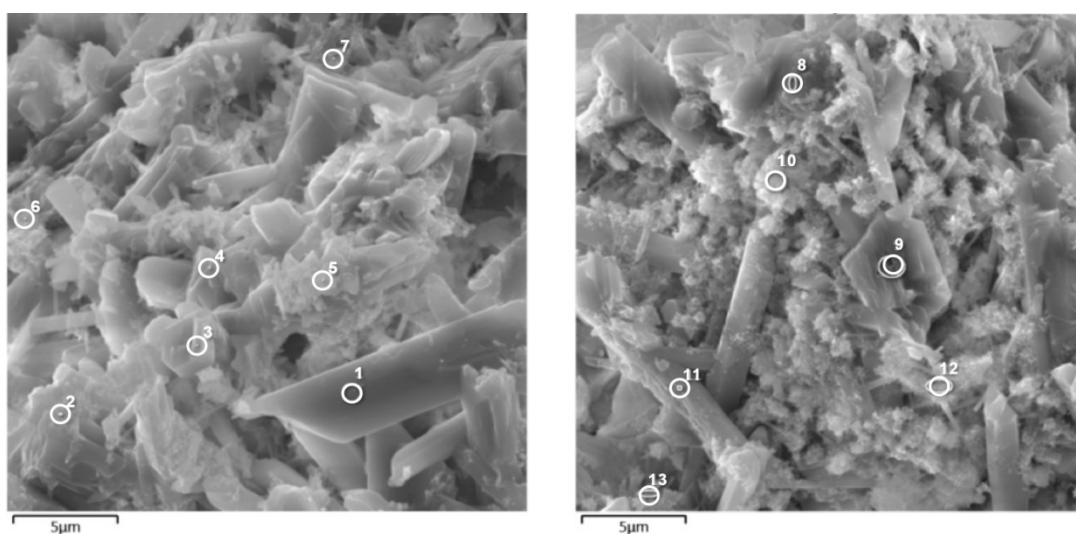


Рис. 4. Продукты гидратации затвердевшего КГВ (28 сут) в точках микрозондирования 1-13

Таблица 2

Элементный состав в точках микрозондирования

№	Элементный состав в точках микрозондирования, масс. %								
	Ca	Si	O	C	S	Fe	Al	Mg	K
1	10,4	9,8	69,0	10,6	0,2	—	—	—	—
2	5,8	4,2	68,0	14,4	3,4	0,8	2,5	0,7	0,2
3	9,4	8,9	69,5	11,8	0,4	—	—	—	—
4	8,7	8,7	71,0	11,4	0,3	—	—	—	—
5	9,7	2,9	65,9	18,5	2,5	—	0,5	—	—
6	9,0	6,3	66,9	16,7	—	—	—	—	—
7	8,5	8,0	66,1	9,3	5,7	0,4	1,6	0,3	0,1
8	9,6	8,3	69,0	12,7	0,4	—	—	—	—
9	12,0	8,5	67,0	12,2	0,4	—	—	—	—
10	10,0	3,4	62,9	22,2	1,6	—	—	—	—
11	10,6	9,9	66,0	11,6	1,0	—	0,2	—	—
12	12,8	5,5	61,7	16,0	3,7	—	0,4	—	—
13	9,6	3,7	63,9	18,2	3,5	—	1,0	—	—

Выводы. Установлено, что многокомпонентные тонкодисперсные минеральные добавки – кварцевый песок, метакаолин ВМК-45, известняковая пыль и комплексная химическая добавка

(MELFLUX 5581 F (0,1 %) + Plast Retard PE (0,08 %)) обеспечивают формирование мелкокристаллической структуры затвердевшего КГВ с упрочненными связями между кристаллами. Аморфная

фаза SiO_2 в составе кварцевого песка и метакрилатов ВМК-45 способствует связыванию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который выделяется при гидратации цемента, и снижает основность твердеющей гипсоцементной системы. В результате создаются условия для исключения роста высокоосновных гидроалюминатов кальция и эттрингита и образования низкоосновных малорастворимых гидросиликатов кальция, заполняющих поры и пустоты вокруг кристаллов двуводного гипса, что способствует повышению физико-механических характеристик гипсоцементного камня.

Выявлено, что комплексные химические добавки MAPFSU 84 (0,1 %) + Plast Retard PE (0,08 %) и MELFLUX 5581 F (0,1 %) + Plast Retard PE (0,08 %), позволяют замедлить начало схватывания гипсоцементных смесей более чем в 5 раз (с 8-30 до 45-00...46-00 мин, соответственно), с увеличением предела прочности при сжатии затвердевшего КГВ: через 2 часа с 6,9 МПа до 7,2...8,1 МПа, через 7 суток с 8,7 МПа до 14,6...15,7 МПа и через 28 суток с 12,3 МПа до 18,3...20,4 МПа, соответственно. Более эффективной является комплексная химическая добавка MELFLUX 5581 F (0,1 %) + Plast Retard PE (0,08 %), позволяющая увеличить конечную прочность затвердевшего КГВ на 66 % (20,4 МПа).

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коровяков В.Ф. Теоретические положения получения водостойких долговечных гипсовых вяжущих // Научные технологии и инновации: Юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова (XXI научные чтения). Том 3. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2014. С. 192–196.
2. Дребезгова М.Ю., Чернышева Н.В., Шаталова С.В. Композиционное гипсовое вяжущее с многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 27–34. doi:10.12737/article_59cd0c5892fe38.35639609.
3. Дребезгова М.Ю. К вопросу кинетики тепловыделения при гидратации гипсовых вяжущих (Часть I) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №3. С. 19–22. doi:10.12737/article_58e23e313d7a16.36013882.
4. Lesovik V., Drebezgova M., Fediuk R. Fast-Curing Composites Based on Multicomponent Gypsum Binders // Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. Vol. 32. No 9. 04020234. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003313.
5. Elistratkin M., Lesovik V., Chernysheva N., Glagolev E., Hardaev P. Structurization of composites when using 3D-additive technologies in construction // Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019. Pp. 315–318.
6. Lesovik V., Chernysheva N., Fediuk R., Amran M., Murali G., de Azevedo A.R.G. Optimization of fresh properties and durability of the green gypsum-cement paste // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 287. 123035. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123035.
7. Отман Азми С.А., Коваленко Е. В., Шпаковская Д.В. Разработка состава композиционного гипсового вяжущего для сухой штукатурной смеси // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова» Материалы конференции. Белгород. 2022. С. 114–117.
8. Хозин В.Г., Майсурадзе Н.В., Мустафина А.Р., Корнянен М.Е. Влияние химической природы пластификаторов на свойства гипсового теста и камня // Строительные материалы. 2019. № 10. С. 35–39. doi: 10.31659/0585-430X-2019-775-10-35-39.
9. Халиуллин М.И., Димиева А.И., Файзрахманов И.И. Влияние добавок механоактивированных минеральных наполнителей на свойства композиционных гипсовых вяжущих // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4(50). С. 386–393.
10. Морозова Н.Н., Кузнецова Г.В., Майсурадзе Н.В., Ахтариев Р.Р., Абдрашитова Л.Р., Низамутдинова Э.Р. Исследование активности пуццоланового компонента и суперпластификатора для гипсоцементно-пуццоланового вяжущего белого цвета // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 26–30. doi:10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30.
11. Buryanov A.F., Galtseva N.A., Morozov I.V., Buldyzhova E.N. Research on the Influence of Gypsum and Anhydrite Stone Impurities on the Properties of the Binder // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 138–146. doi:10.1007/978-3-030-68984-1_21.
12. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochytka R., Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder // Smart and Sustainable Built Environment. 2021. Vol. 10. No 4. Pp. 702–710. doi: 10.1108/SASBE-04-2020-0037.
13. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Худовекова Е.А. Гипсовое вяжущее низкой водопотребности: производство и свойства // Строительные материалы.

2020. № 7. С. 34–38. doi:10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38.

14. Рузина Н.С., Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Первушин Г.Н., Семёнова Ю.А., Бегунова Е.В. Модификация вяжущих на основе сульфата кальция комплексными добавками // Строительные материалы. 2020. № 7. С. 18–22. doi: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-18-22.

15. Кузнецова Т.В., Нефедьев А.П., Коссов Д.Ю. Кинетика гидратации и свойства цемента с добавкой метакаолина // Строительные материалы. 2015. №7. С. 3–6. doi:10.31659/0585-430X-2015-727-7-3-6.

16. Petropavlovskaya V., Zavadko M., Novichenkova T., Sulman M., Buryanov A. Effective building mixtures based on hemihydrate plaster and highly dispersed mineral fillers // Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, 09–10 марта 2021 года. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. 012056. doi:10.1088/1742-6596/1926/1/012056.

17. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф., Яковлев Г.И., Бурьянов А.Ф., Стивенс А.Э.,

Бегунова Е.В. Структура и свойства гипсовых композиций с минеральными дисперсными добавками // Строительные материалы. 2021. № 10. С. 49–53. doi:10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53.

18. Бурьянов А.Ф., Фишер Х.-Б., Коровяков В.Ф., Гальцева Н.А., Булдыжова Е.Н. Ангидритовое вяжущее, модифицированное комплексной добавкой, для сухих строительных смесей // Строительные материалы. 2022. № 8. С. 36–40. doi:10.31659/0585-430X-2022-805-8-36-40.

19. Гордина А.Ф., Полянских И.С., Жукова Н.С., Яковлев Г.И. Исследование влияния пуццоланового компонента на структуру и состав модифицированных сульфатных матриц // Строительные материалы. 2022. № 8. С. 51–58. doi:10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58.

20. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: Учеб. пособие. М.: Высш. школа. 1981. 335 с.

Информация об авторах

Отман Азми С.А., аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: azmiothman2222@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чернышева Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дребезгова Мария Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры и градостроительства, E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Коваленко Елена Валерьевна, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: elenadmitriev@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Вашева Светлана Владимировна, магистрант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: sveta.masalitina2017@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.02.2022 г.

© Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Вашева С.В., 2023

Otman Azmi S.A., *Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Vasheva S.V.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: chernysheva56@rambler.ru

FEATURES OF STRUCTURE FORMATION OF COMPOSITE GYPSUM BINDERS WITH A COMPLEX OF MINERAL AND ORGANIC ADDITIVES

Abstract. For the dynamically developing low-rise construction industry, there is a growing need to expand the range of building materials, including fast-hardening types of binders. Composite gypsum binders are effective, including a carefully selected mixture of gypsum binder, Portland cement and active mineral additives. Materials based on them harden quickly and gain the required strength. An increase in the performance characteristics of this type of binders is achieved when mineral and chemical additives are used in a complex. This helps to regulate the processes of their structure formation and hardening, depending on the

activity of the components, changes in water demand, as well as the peptizing, adsorption and air-entrapping effects of chemical additives. The article presents the results of a study of the effect of chemical additives – superplasticizers MARF SU 84, MELFLUX 5581 F and the retarder of the setting time of PlastRetard PE – on the physico-mechanical properties of a hardened composite gypsum binder, including gypsum binder, Portland cement and a complex of mineral components (fine quartz sand, metacaolin VMK-45, limestone dust). The issues of management of its structuring processes are considered. It has been established that finely dispersed mineral additives from quartz sand, VMK-45 metacaolin and limestone dust are effective components for the production of composite gypsum binders. The developed complex chemical additives MARFSU 84 (0.1 %)+PlastRetard PE (0.08%) and MELFLUX 5581 F (0.1 %)+ PlastRetard PE (0.08 %) can significantly slow down the beginning and end of setting of gypsum cement mixtures up to 45...48 min and increase the compressive strength of the hardened KGV after 28 days by 1.5...1.6 times (up to 18.3...20.4 MPa), respectively.

Keywords: composite gypsum binder, mineral additives, chemical additives, properties

REFERENCES

1. Korovyakov V.F. Theoretical provisions for obtaining water-resistant durable gypsum binders [Teoreticheskie polozheniya polucheniya vodostojkikh dolgovechnykh gipsovykh vyazhushchih]. High-tech technologies and innovations: Jubilee International scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of V.G. Shukhov BSTU (XXI scientific readings). Vol. 3. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2014. Pp. 192–196. (rus)
2. Drebezgova M.Yu., Chernysheva N.V., Shatalova S.V. Composite gypsum binder with multicomponent mineral additives of different genesis [Kompozicionnoe gipsovoe vyazhushchee s mnogokomponentnymi mineral'nymi dobavkami raznogo genezisa]. Bulletin of BSTU im. V.G. Shukhov. 2017. No. 10. Pp. 27–34. doi:10.12737/article_59cd0c5892fe38.35639609. (rus)
3. Drebezgova M.Yu. On the issue of heat release kinetics during hydration of gypsum binders (Part I) [K voprosu kinetiki teplovydeleniya pri gidratatsii gipsovykh vyazhushchih (CHast' I)]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No.3. Pp. 19–22. doi: 10.12737/article_58e23e313d7a16.36013882. (rus)
4. Lesovik V., Drebezgova M., Fedyuk R. Fast-hardening composites based on multicomponent gypsum binders. Journal of materials in civil construction. 2020. Vol. 32. No. 9. 04020234. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003313.
5. Elistratkin M., Lesovik V., Chernysheva N., Glagolev E., Khardaev P. Structuring composites using 3D additive technologies in construction. Earth and Environmental Sciences. 2019. Pp. 315–318.
6. Lesovik V., Chernysheva N., Fedyuk R., Amran M., Murali G., de Azevedo A.R.G. Optimization of freshness and durability properties of green gypsum cement mass. Construction and building materials. 2021. Vol. 287. 123035. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123035.
7. Otman Azmi S.A., Kovalenko E. V., Shpakovskaya D.V. Development of the composition of a composite gypsum binder for dry plaster mixture [Razrabotka sostava kompozicionnogo gipsovogo vyazhushchego dlya suhoj shtukaturnoj smesi]. In the collection: International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU" Conference materials. Belgorod. 2022. Pp. 114–117. (rus)
8. Khozin V.G., Maisuradze N.V., Mustafina A.R., Kornyanen M.E. The influence of the chemical nature of plasticizers on the properties of gypsum dough and stone [Vliyanie himicheskoy prirody plastifikatorov na svoystva gipsovogo testa i kamnya]. Building materials. 2019. No. 10. Pp. 35–39. doi:10.31659/0585-430X-2019-775-10-35-39. (rus)
9. Khaliullin M.I., Dimieva A.I., Fayzrahmanov I.I. The effect of additives of mechano-activated mineral fillers on the properties of composite gypsum binders [Vliyanie dobavok mekhanoaktivirovannykh mineral'nykh napolnitelej na svoystva kompozicionnykh gipsovykh vyazhushchih]. Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. No. 4(50). Pp. 386–393. (rus)
10. Morozova N.N., Kuznetsova G.V., Maisuradze N.V., Akhtariyev R.R., Abdrashitova L.R., Nizamutdinova E.R. Investigation of the activity of the pozzolan component and superplasticizer for gypsum cement-pozzolan binder of white color [Issledovanie aktivnosti puccolanovogo komponenta i superplastifikatora dlya gipsocementno-puccolanovogo vyazhushchego belogo cveta]. Building materials. 2018. No. 8. Pp. 26–30. doi: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-26-30. (rus)
11. Buryanov A.F., Galtseva N.A., Morozov I.V., Buldyzhova E.N. Investigation of the influence of gypsum and anhydrite stone impurities on the properties of the binder. Lecture notes on civil engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 138–146. doi:10.1007/978-3-030-68984-1_21.
12. Yakovlev G.I., Gordina A., Drochitka R., Buryanov A.F., Smirnova O. Structure and properties of modified gypsum binder. Smart and sustainable construction environment. 2021. Vol. 10. No. 4. Pp. 702–710. doi:10.1108/SASBE-04-2020-0037.
13. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Nefediev A.P., Khudovekova E.A. Gypsum binder of low water demand: production and

properties [Gipsovoe vyazhushchee nizkoj vodopotrebnosti: proizvodstvo i svoystva]. Building materials. 2020. No. 7. Pp. 34–38. doi:10.31659/0585-430X-2020-782-7-34-38. (rus)

14. Ruzina N.S., Yakovlev G.I., Gordina A.F., Pervushin G.N., Semenova Yu.A., Begunova E.V. Modification of binders based on calcium sulfate with complex additives [Modifikatsiya vyazhushchih na osnove sul'fata kal'ciya kompleksnymi dobavkami]. Building materials. 2020. No. 7. Pp. 18–22. doi:10.31659/0585-430X-2020-782-7-18-22. (rus)

15. Kuznetsova T.V., Nefediev A.P., Kossov D.Yu. Hydration kinetics and properties of cement with metakaolin additive [Kinetika gidratsii i svoystva cementa s dobavkoj metakaolina]. Building materials. 2015. No. 7. Pp. 3–6. doi: 10.31659/0585-430X-2015-727-7-3-6. (rus)

16. Petropavlovsk V., Zavadko Yu., Novichenkova T., Sulman M., Buryanov Yu. Effective building mixes based on semi-hydrated plaster and highly dispersed mineral fillers. Physical journal: Conference series, Belgorod, March 09–10, 2021. Vol. 1926. Belgorod: LLC "Publishing House IOP", 2021. 012056. doi:10.1088/1742-6596/1926/1/012056.

17. Batova M.D., Semenova Yu.A., Gordina A.F., Yakovlev G.I., Buryanov A.F., Stevens A.E.,

Begunova E.V. Structure and properties of gypsum compositions with mineral dispersed additives [Struktura i svoystva gipsovyh kompozitsij s mineral'nymi dispersnymi dobavkami]. Building materials. 2021. No. 10. Pp. 49–53. doi:10.31659/0585-430X-2021-796-10-49-53. (rus)

18. Buryanov A.F., Fischer H.-B., Korovyakov V.F., Galtseva N.A., Buldyzhova E.N. Anhydrite binder modified with a complex additive for dry building mixes [Angidritovoe vyazhushchee, modifitsirovannoe kompleksnoj dobavkoj, dlya suhih stroitel'nyh smesey]. Building materials. 2022. No. 8. Pp. 36–40. doi:10.31659/0585-430X-2022-805-8-36-40. (rus)

19. Gordina A.F., Polyanskikh I.S., Zhukova N.S., Yakovlev G.I. Investigation of the effect of the pozzolan component on the structure and composition of modified sulfate matrices [Issledovanie vliyaniya puccolanovogo komponenta na strukturu i sostav modifitsirovannykh sul'fatnykh matric]. Building materials. 2022. No. 8. Pp. 51–58. doi:10.31659/0585-430X-2022-805-8-51-58. (rus)

20. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. Methods of physico-chemical analysis of binders: Textbook.manual [Metody fiziko-himicheskogo analiza vyazhushchih veshchestv: Ucheb.posobie]. M.: Higher.school.1981. 335 p. (rus)

Information about the authors

Otman, Azmi S.A. Postgraduate student. E-mail: azmiothman2222@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernysheva, Natalia V. DSc, Professor. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Drebezgova, Maria Yu. PhD. E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Vasheva, Svetlana V. Master's student. E-mail: sveta.masalitina2017@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 09.02.2023

Для цитирования:

Отман Азми С.А., Чернышева Н.В., Дребезгова М.Ю., Коваленко Е.В., Вашева С.В. Особенности структурообразования композиционных гипсовых вяжущих с комплексом минеральных и органических добавок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33

For citation:

Otman Azmi S.A., Chernysheva N.V., Drebezgova M.Yu., Kovalenko E.V., Vasheva S.V. Features of structure formation of composite gypsum binders with a complex of mineral and organic additives. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 24–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-24-33

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-34-45

Траутвайн А.И., *Тимофеев Д.Г.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: daniil_timofeev_99@mail.ru*

РАЗРАБОТКА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НА ОСНОВЕ АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. Транспортно-эксплуатационное состояние сети автомобильных дорог любой страны является показателем ее экономического развития. За последнее время произошел значительный рост транспортных нагрузок на конструктивные слои дорожной одежды за счет увеличения грузооборота внутри страны. Для сохранения эксплуатационной надежности автомобильных дорог, продления их жизненного цикла необходимы качественные и инновационные материалы, адаптированные к ним технологические режимы производства работ. Одним из эффективных подходов повышения качества автомобильных дорог является устройство основания дорожных одежд с использованием переработанного асфальтобетонного покрытия (RAP: Recycled asphalt pavement) в комплексе с неорганическими вяжущими. В качестве вяжущего в работе был исследован доменный шлак при укреплении асфальтогранулобетонной смеси (АГБС), взамен традиционно используемого портландцемента. Установлено, что образцы асфальтогранулобетона на основе шлака, активированного гидратными двойными сульфатными солями алюминия, превышают прочностные характеристики композита с использованием портландцемента. Активированный шлак при использовании в составе АГБ показывает высокую эффективность по показателю непрямого растяжения при температуре 0 °С, что свидетельствует о высокой трещиностойкости образцов композита. Наибольшую эффективность по комплексу исследуемых показателей демонстрируют составы с использованием активного вещества на основе двойных сульфатных солей алюминия в комплексе с калием. Особенность разрабатываемых составов заключается в том, что активация шлака осуществляется без использования едкой щелочи или других низкомолекулярных растворимых силикатов (традиционно используемых), а за счет введения гидратированных двойных сульфатных солей алюминия. Применение данных химических реагентов способствует созданию щелочной среды (гидроксидов калия, натрия и алюминия) в твердеющем материале с течением времени в процессе их продолжительного контакта со шлаком. Таким образом, не происходит отрицательного влияния щелочи на строительную технику и рабочий персонал.

Ключевые слова: асфальтогранулобетонная смесь (АГБ), конструктивные слои дорожной одежды, портландцемент, активация, доменный шлак.

Введение. Укрепление основания при строительстве автомобильных дорог – эффективный подход к конструированию дорожных одежд, который может предусматривать использование местных материалов, что приводит к снижению затрат при строительстве конструктивных слоев дорожной одежды. Основным интересом представляет укрепление основания дорожной одежды на основе асфальтогранулобетонной смеси (АГБС) неорганическим вяжущим [1–4]. Большая часть исследований и производителей работ по устройству слоев на основе АГБС использует в качестве неорганического вяжущего – цемент, производство которого является энергоемким процессом. Более того, ежегодный рост выбросов углекислого газа в атмосферу при производстве цемента расширяет необходимость применения в строительстве альтернативных видов вяжущих [5–7].

Исследованиями по созданию альтернативного вида вяжущего, способного заменить традиционный портландцемент, ученые различных стран занимаются достаточно давно [7–10].

Известно, что гранулированные доменные шлаки, состоящие из аморфной фазы, обладают гидравлической активностью. Большинство шлаков, находящихся в отвалах металлургических комбинатов, являются отходами и не представляют интереса ввиду высокого содержания малоактивной кристаллической фазы. Более того, особенностью шлаков, как вяжущего материала, является долгий процесс набора прочности. Поэтому существует необходимость в модифицировании шлака с целью повышения его активности и ускорения набора прочности образцов с его использованием в качестве основного неорганического вяжущего в проектные сроки, а именно, в течение 28 суток [9–11].

Анализ литературных данных показывает [12–21], что усилить гидравлическую активность шлаков и ускорить процесс набора прочности шлакового вяжущего возможно путем его затворения растворами щелочей натрия или калия, в частности жидкостекольным связующим. Приво-

дятся рецептуры и исследуются свойства бесклнкерных вяжущих щелочной активации на минеральных тонкодисперсных порошках доменных шлаков.

Использование вяжущего на основе доменного шлака при укреплении асфальтогранулобетонных смесей для дорожного строительства не получило распространения. В первую очередь, это связано с тем, что шлаки имеют невысокую активность, по сравнению с традиционным цементом, а ее увеличение возможно с использованием специальных добавок, оказывающих негативное влияние, как на технологическое оборудование, так и рабочий персонал. Цель работы заключалась в получении образцов асфальтогранулобетона с использованием доменного шлака, прочностные характеристики которого будут аналогичны образцам с применением портландцемента. Задача исследования заключалась в разработке специальных добавок, способствующих

активации малоактивного молотого доменного шлака, который может эффективно использоваться при укреплении асфальтогранулобетонных смесей при холодном ресайклинге асфальтобетонных покрытий.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов были использованы: асфальтогранулят с номинальным максимальным размером зерен 22,4 мм согласно требованиям ОДМ 218.6.1.005-2021 [22], цемент класса ЦЕМ I 42,5Н нормированного состава, по ГОСТ 31108-2020 [23], доменный шлак Новолипецкого металлургического комбината (ПАО "НЛМК"), химические добавки на основе двойных сульфатных солей алюминия и калия или натрия, вода по ГОСТ 23732 [24].

Гранулометрический состав асфальтогранулобетонной смеси представлен на рисунке 1.

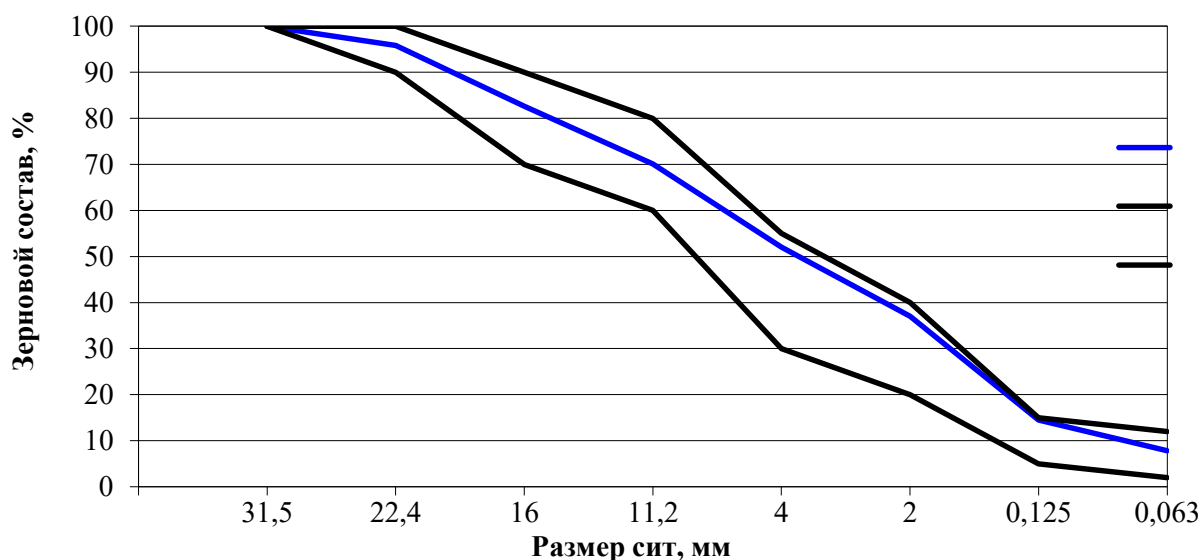


Рис. 1. Гранулометрический состав асфальтогранулята
а) полные проходы, %, б) границы требований ОДМ 218.6.1.005-2021

Химический состав молотого гранулированного шлака представлен в таблице 1, фазовый состав – в таблице 2.

Химический состав определяли на рентгенофлуоресцентном спектрометре серии ARL 9900 WorkStation (Thermo Fisher Scientific); рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре

ДРОН-3 с использованием Си-излучения в интервале углов отражения (2θ) 4–56°. Вяжущая активность исходного шлака по прочности в возрасте 28 суток, определяемая по ГОСТ 30744 [25], составляла: на изгиб – 5,2 МПа; сжатие – 9,8 МПа. Физико-механические характеристики цемента производства АО «Себряковцемент» I 42,5 представлены в табл. 3.

Таблица 1

Химический состав молотого шлака ПАО «НЛМК»

Химический состав, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	MnO	TiO ₂	R ₂ O	Cl ⁻	Сумма
Требования ГОСТ Р 56592-2015	не норм.	не норм.	не норм.	не норм.	не норм.	не более 3,5, %	не норм.	не норм.	не норм.	не более 0,1, %	не норм.
Граншлак ПАО "НЛМК"	37,46	6,29	0,91	41,67	9,62	1,74	0,35	0,38	0,82	0,093	99,33

Таблица 2

Фазовый состав молотого шлака ПАО «НЛМК»

Фазовый состав, %	Массовая доля аморфной фазы (BFS_ amorphous) (%)	Кварц (Quartz) (%)	Кальцит (Calcite) (%)	Мервинит (Merwinite) (%)	Мелилит (Melilite) (%)	Бредигит (Bredigite) (%)
Граншлак ПАО «НЛМК»	43,63	0,72	28,71	16,34	2	8,6

Таблица 3

Физико-механические характеристики ЦЕМ I 42,5

Наименование показателя	Требования по ГОСТ 31108-2020	Фактические результаты
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 2 сут. 28 сут.	не менее 10 42,5–62,5	11,2 44,8
Начало схватывания, мин	не ранее 60	68

При проведении экспериментальных работ были исследованы образцы АГБ типа М (АГБС-М) с использованием доменного шлака, модифицированного различными химически активными веществами, составы которого приведены в таблице 4. Процесс модификации шлака заключался в совместном измельчении гранулированного

шлака со специальными добавками в определенных концентрациях. В качестве контроля были приготовлены образцы АГБ с использованием цемента ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2020 [23]. Количество вяжущего составило 3,6 % от массы минеральной части АГБ. Влажность смеси в процессе формования составляла 2 %.

Таблица 4

Составы модифицированного шлака

Номер состава	1	2	5	8
Количество используемого активного вещества от массы шлака	Шлак без добавок	6 % гидратированной двойной сульфатной соли алюминия и калия	6 % гидратированной двойной сульфатной соли алюминия и натрия	6 % гидратированной двойной сульфатной соли алюминия и калия/натрия (соотношение: 50/50)

Исследование физико-механических характеристик образцов АГБ проводили согласно методике, изложенной в ГОСТ 12801-98 [26], через 7 и 28 сут набора прочности по следующим показателям: водостойкости, водонасыщению, пределам прочности водонасыщенных образцов, а также при сжатии при температуре 20 и 50 °С.

В работе проводили определение pH контактной среды в процессе набора прочности исследуемых неорганических вяжущих: портландцемента, а также активированного и неактивированного шлака. Методика заключалась в изготовлении образцов исследуемых вяжущих с размером грани 2 см. Образцы каждого состава через определенный интервал времени набора прочности (3, 5, 10, 14, 20, 28 суток) помещали в дистиллированную воду объемом 50 мл (высота воды над образцом составляла 1,5–2 см). Время выдерживания образца составляло 24 часа. Далее проводили определение pH воды, в которой находился образец. Определение pH основано на ме-

тоде прямой потенциометрии – измерении потенциала индикаторного электрода, погруженного в исследуемый раствор (воду).

Основная часть. Прочность конструктивных слоев автомобильной дороги является важным показателем, так как влияет на ее несущую способность и долговечность. Поэтому при устройстве конструктивных слоев дорожной одежды автомобильной дороги необходимо обеспечивать высокие физико-механические характеристики используемых материалов в основании.

Изготовление образцов АГБ проводили по методике ГОСТ 12801-98 [27] и выдерживали в камере нормального твердения в течение необходимого периода. Физико-механические характеристики исследуемых составов на 7 и 28 суток представлены в таблице 5.

Анализ данных, представленных в таблице 5, показал падение физико-механических показателей образцов АГБ типа М на основе портландцемента к 28 суткам набора прочности, по сравнению с прочностью на 7 сутки. Данная тенденция не является исключением и часто отмечается

строительными организациями, производящими продукцию с использованием портландцемента. Явление снижения прочностных характеристик композиционных материалов с использованием портландцемента, а, следовательно, и несущей способности конструкции в целом вызывает обеспокоенность среди подрядных организаций. Стоит отметить, что наиболее часто данная тенденция проявляется в конструкциях и материалах для дорожного строительства, эксплуатация которых находится под воздействием агрессивных сред. Стоит отметить, что при разработке конструктивных слоев дорожных одежд из укрепленных щебеночно-гравийно-песчаных смесей и

грунтов, анализ их химической активности поверхности не проводится, так как не регламентируется нормативными документами. При этом известно, что именно заполнитель часто становится причиной различного рода коррозии цементного камня. Таким образом, цементный камень в составе дорожных композиционных материалов может быть подвержен агрессивному воздействию, как со стороны окружающей среды, так и входящих в его состав компонентов.

При использовании шлакового вяжущего при укреплении АГБС падение прочности образцов не наблюдается.

Таблица 5

Физико-механические показатели образцов АГБ

Наименование показателя	Номер состава				
	К	1	2	5	8
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, R_{20} , МПа	$\frac{3,8}{3,2}$	$\frac{2,5}{2,8}$	$\frac{2,6}{3,4}$	$\frac{1,6}{3,1}$	$\frac{2,1}{3,9}$
Предел прочности при сжатии при температуре 50 °С, R_{50} , МПа	$\frac{-}{1,75}$	$\frac{-}{1,38}$	$\frac{-}{1,85}$	$\frac{-}{1,88}$	$\frac{-}{1,76}$
Предел прочности при непрямом растяжении при температуре 0 °С, R_0 , МПа	$\frac{0,98}{0,82}$	$\frac{0,85}{1,0}$	$\frac{0,58}{1,69}$	$\frac{0,97}{1,36}$	$\frac{0,77}{1,68}$
Предел прочности при сжатии образцов в водонасыщенном состоянии, $R_{вод}$, МПа	$\frac{3,6}{2,9}$	$\frac{2,3}{2,8}$	$\frac{3,1}{3,3}$	$\frac{2,0}{3,4}$	$\frac{2,8}{3,6}$
Водостойкость	$\frac{0,95}{0,91}$	$\frac{0,92}{1,00}$	$\frac{1,19}{0,97}$	$\frac{1,25}{1,03}$	$\frac{1,33}{0,92}$
Водонасыщение	$\frac{8,4}{9,7}$	$\frac{12,5}{11,1}$	$\frac{12,1}{7,9}$	$\frac{10,2}{7,3}$	$\frac{11,7}{7,9}$

Примечание: числитель – физико-механические показатели образцов АГБ на 7 сутки; знаменатель – физико-механические показатели образцов АГБ на 28 сутки

Образцы АГБ с использованием шлакового вяжущего через 7 суток набора прочности уступают контрольному составу на основе портландцемента по всем физико-механическим характеристикам. Однако к 28 суткам набора прочности составы АГБ на модифицированном шлаке значительно превышают значения показателей композита с использованием портландцемента по показателям: прочности при непрямом растяжении при температуре 0 °С, при сжатии в водонасыщенном состоянии. Стоит отметить, что образцы АГБ с использованием неактивированного шлака (состав № 1) на 7 и 28 суток набора прочности имеют более низкие показатели по сравнению с контрольным составом по всем характеристикам.

Максимальный прирост предела прочности при сжатии образцов АГБ на 28 суток при температуре 20 °С наблюдается для составов № 2 и 8 и представлен на рисунке 2. Особенностью указанных составов является то, что они включают гидратированную двойную сульфатную соль алюминия и натрия в комплексе с калием.

Стоит отметить, что активированный шлак при использовании в составе АГБ показывает высокую эффективность по показателю непрямого растяжения при температуре 0 °С. Данный показатель является одним из наиболее важных характеристик для конструктивных слоев дорожной одежды автомобильных дорог. Известно, что материал дорожной конструкции с использованием неорганических вяжущих обладает высокой жесткостью в зимний период, что приводит к появлению сетки трещин в слое, а, следовательно, его излишнему влагонакоплению и снижению морозостойкости.

Максимальное увеличение предела прочности при непрямом растяжении образцов при температуре 0 °С через 28 суток набора прочности наблюдается для составов № 2 и 8 и составляет 106 и 105 % соответственно (рис. 3), где в качестве активатора шлака использовали гидратированную двойную сульфатную соль алюминия, включая калий. Увеличение прочности АГБ в пределах 60 % наблюдается для образцов составов № 5. Стоит отметить, что показатель предела прочности при сжатии образцов АГБ при 50 °С не

показывает высокую эффективность при использовании активированного шлака. Тем не менее, через 28 суток нормального твердения наблюдается рост прочности образцов составов № 2 и №

8 – не более 8 % относительно образцов контрольного состава; для образцов с использованием неактивированного шлака (состав № 1) наблюдается падение показателя в пределах 20 %.

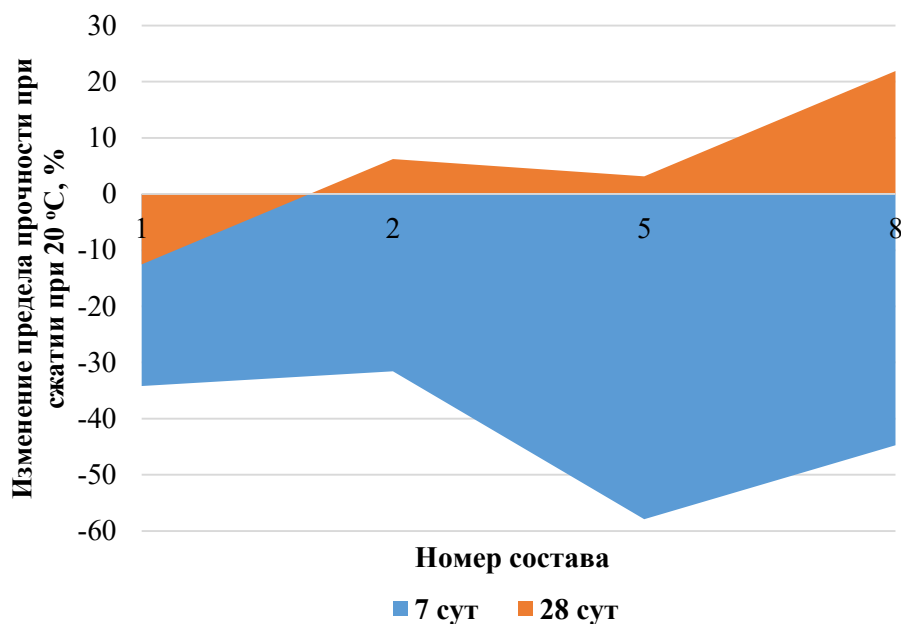


Рис. 2. Изменение предела прочности при сжатии при температуре 20 °C

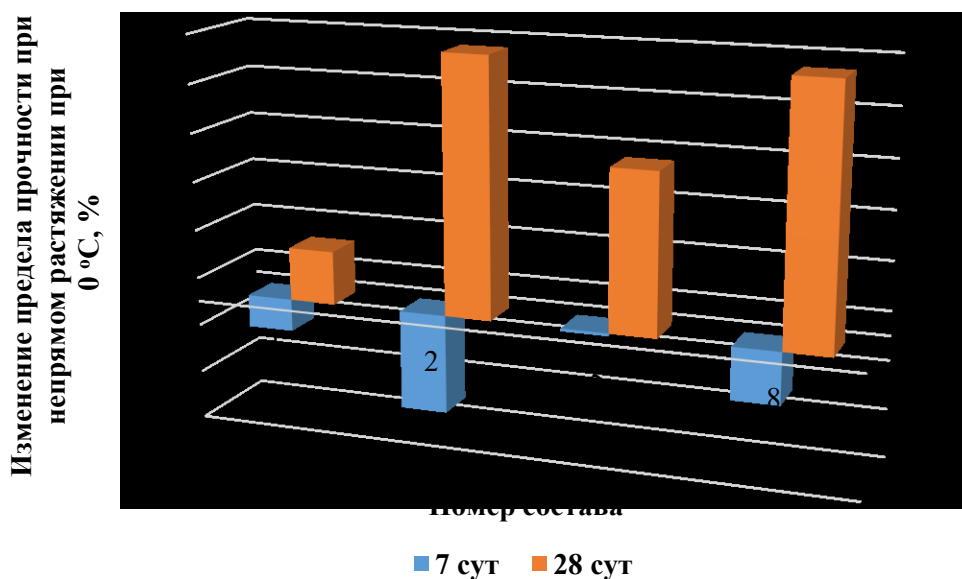


Рис. 3. Изменение предела прочности при непрямом растяжении при температуре 0 °C

Автомобильная дорога подвержена воздействию воды, как одного из наиболее разрушительных факторов внешней среды. В зимний период переувлажнение конструктивных элементов автомобильной дороги приводит к разрушению покрытия и образованию трещин в результате попеременного замораживания-оттаивания материала конструкции. Поэтому показатели:

предел прочности при сжатии образцов в водонасыщенном состоянии, их водостойкость и водонасыщение, способны наглядно показать эффективность применяемых решений. Максимальный прирост прочности при сжатии образцов в водонасыщенном состоянии через 28 суток наблюдается для состава № 8 в пределах 25 % (рис. 4). Образцы АГБ № 2 и № 5 показали рост данного показателя на 14 и 17 % соответственно.

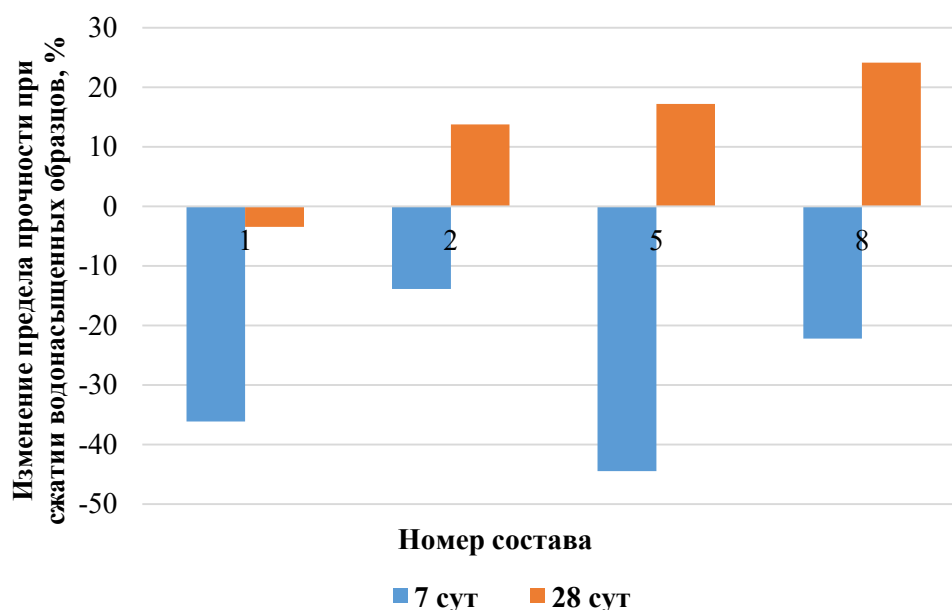


Рис. 4. Изменение предела прочности при сжатии водонасыщенных образцов

Анализ графика на рисунке 5 показывает уменьшение показателя водонасыщения образцов АГБ с использованием активированного шлака. Так, максимальное падение водонасыщения демонстрируют образцы с модификатором двойной сульфатной соли алюминия в комплексе с натрием (состав № 5). Максимальный рост водостойкости образцов АГБ наблюдается также для состава № 5 и составляет 13 % (рис. 6). Абсолютные показатели водостойкости и водонасыщения образцов АГБ на модифицированном шлаке различных составов аналогичны друг

другу. Так, водонасыщение композитов варьирует в пределах от 7,3 до 7,9 %, а показатель водостойкости изменяется от 0,92 до 1,03. Значения прочности образцов АГБ № 2 и № 8 в водонасыщенном состоянии к 28 суткам близки образцам, испытанным при температуре 20 °С. Это свидетельствует о том, что вода оказывает меньше отрицательного влияния на прочность образцов АГБ, приготовленных с использованием модифицированного шлака двойной сульфатной солью алюминия в комплексе с калием, чем с натрием.

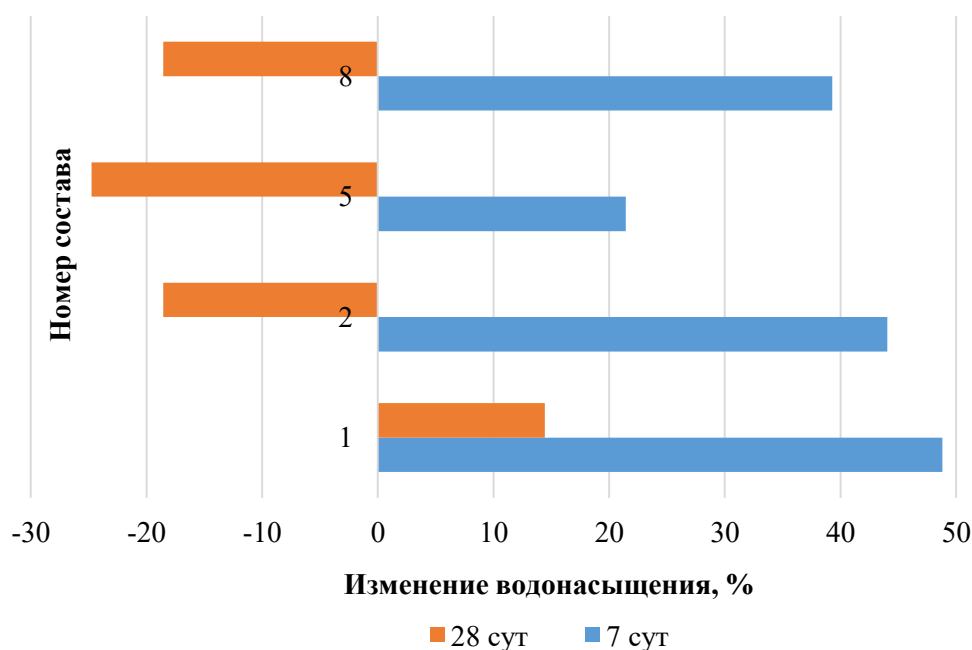


Рис. 5. Изменение показателя водонасыщения

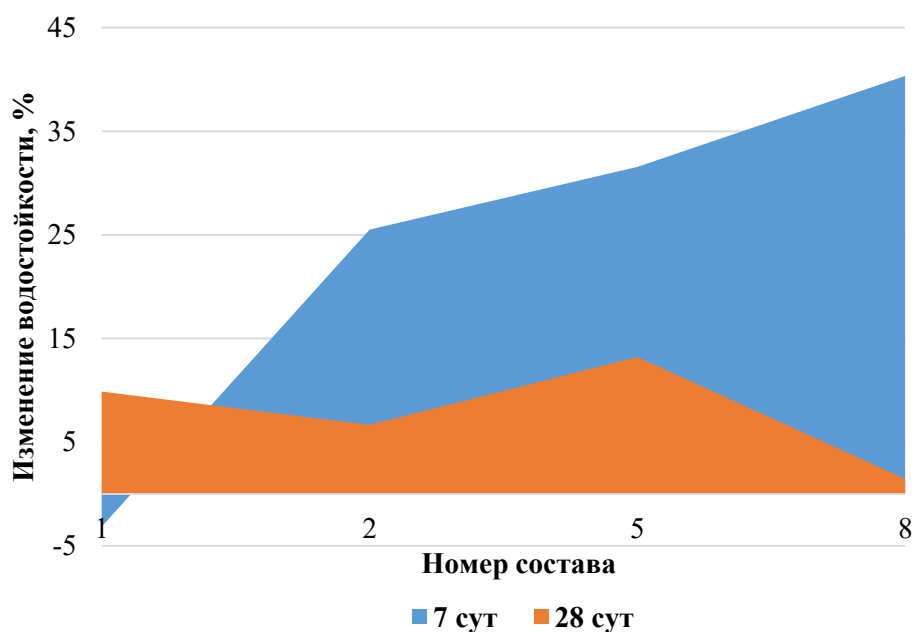


Рис. 6. Изменение показателя водостойкости

Оценка pH среды материала, после затворения модифицированного шлака водой показывает (рис. 7), что используемые химические добавки увеличивают щелочную среду в процессе набора прочности шлакового вяжущего. Из графика видно, что портландцемент имеет максимальную pH контактной среды в течение первых трех суток набора прочности ($\text{pH} = 11,5$), который снижается до значения равного 9 через 10 суток твердения. Вяжущее на основе шлака демонстрирует рост pH водной среды в процессе набора прочности, который увеличивается при введении двойных сульфатных солей алюминия

в комплексе с калием и/или натрием. Особенностью гидролиза двойных сульфатных солей алюминия в комплексе с калием и/или натрием является образование гидроксида алюминия ($\text{Al}(\text{OH})_3$), который представляет собой гелеобразное вещество, обладающее амфотерными свойствами. Гидроксид алюминия замедляет процесс быстрого образования едких щелочей калия и натрия на начальной стадии введения солей в состав шлакового вяжущего. В результате, pH среды шлакового вяжущего в первые 3 суток набора прочности не превышает 9.

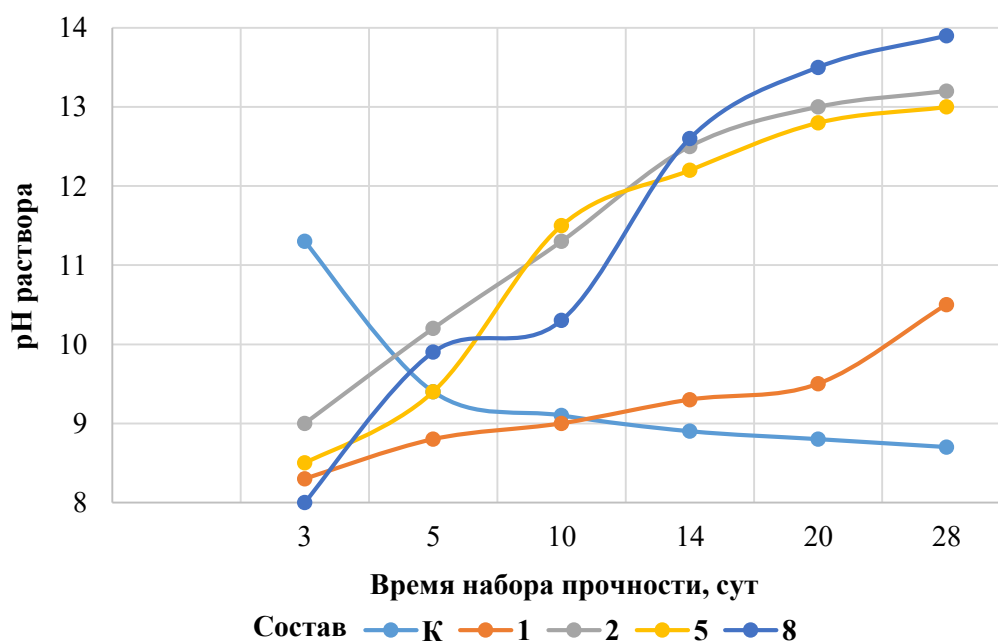


Рис. 7. Изменение pH среды исследуемых неорганических вяжущих в процессе набора прочности

Эффективность применения добавок обусловлена такими процессами как частичное растворение основных минералов шлака (геленита $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, акерманита $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$, мервинита $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) с выделением $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и последующем – ионов K^+ и Na^+ в водном растворе. Образование новых центров кристаллизации способствуют нарастанию прочности с течением времени, превышающей контрольный состав с использованием высокомарочного цемента. Стоит отметить, что большую роль в повышении реакционной способности шлака в результате роста количества активных центров связано с концентрацией и технологической последовательности введения химических реагентов. Однако, данное объяснение является гипотезой, требующей проведения дальнейших исследований. При этом остается актуальным вопрос необходимости увеличения показателя прочности образцов АГБ в водонасыщенном состоянии к 28 суткам набора прочности с использованием вяжущего на основе модифицированного доменного шлака.

Выводы.

1. Образцы АГБ с использованием шлакового вяжущего через 7 суток набора прочности уступают контрольному составу на основе портландцемента по всем физико-механическим характеристикам. Однако к 28 суткам набора прочности составы АГБ на модифицированном шлаке значительно превышают значения показателей композита с использованием портландцемента по показателям: прочности при непрямом растяжении при температуре 0°C , при сжатии в водонасыщенном состоянии.

2. Образцы АГБ с использованием неактивированного шлака на 7 и 28 сутки набора прочности имеют более низкие показатели по сравнению с контрольным составом по всем характеристикам.

3. Активированный шлак показывает высокую эффективность при использовании в составе АГБ по показателю непрямого растяжения при температуре 0°C , что свидетельствует о высокой трещиностойкости образцов композита.

4. Наибольшую эффективность по комплексу исследуемых показателей демонстрируют составы с использованием активного вещества на основе двойных сульфатных солей алюминия в комплексе с калием.

5. Химические добавки на основе двойных сульфатных солей алюминия в комплексе с калием и/или натрием увеличивают щелочную среду в процессе набора прочности шлакового вяжущего.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстегнеева В.Н., Степанец В.Г. Ремонт и реконструкция асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга // Молодой ученый. 2017. №38. С. 21–28.
2. Зарапина Л.С., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Влияние свойств материала, получаемого при холодном фрезировании покрытий нежесткого типа, на деформацию слоя при устройстве дорожной одежды // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. №. 1. С. 85–95. DOI: 10.36622/VSTU.2022.65.1.008.
3. Ярмолинский В.А., Жабкин М.О., Ярмолинская Е.В. Исследование оптимального количества вяжущего при укреплении асфальтогранулобетона // Международный сборник научных трудов. 2020 Выпуск 20. С. 305–313.
4. Кобцев Д.В., Кобушко Е.А. Асфальтогранулят – перспективный материал в дорожном строительстве // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 2125–2131
5. Карпенко С.А. К вопросу практического применения современных материалов и конструкций в дорожном хозяйстве // Современные прикладные исследования. 2019. С. 121–125.
6. Ширяшкина Д.Р. Использование местных строительных материалов и вторичных продуктов производства для укрепления обочин региональных дорог // Материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Волгоград, 2021. С. 168–171.
7. Багров И.А., Ягунов А.А., Дудин В.М. Подбор состава асфальтогранулобетонной смеси при ремонте покрытий автомобильных дорог методом холодной регенерации // материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. Vydavatel «Osvícení», Научно-издательский центр «Мир науки». Нефтекамск, 2021. С. 25–28.
8. Боровик Н.С., Журавлев Д.В. Регенерация дорожной одежды методом холодного ресайклинга // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 2021–2025.
9. Grilli A., Bocci, M., Tarantino A.M. Experimental investigation on fibre-reinforced cement-treated materials using reclaimed asphalt // Construction and Building Materials. 2013. Pp. 491–496.
10. One L., Tjaronge M.W., Irmawaty R., Hustin M. Effect of portland composite cement and buton granular asphalt on indirect tensile strength of emulsified asphalt cold mix using limestone aggregate // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 419(1).

11. Potturi A. Evaluation Of Resilient Modulus Of Cement And Cement-fiber Treated Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) // Conference Series: Earth and Environmental Science 423(1).

12. Нахаев М.Р., Саламанова М.Ш., Исмаилова З.Х. Закономерности протекания процессов формирования структуры и прочности бесклнкерного вяжущего щелочной активации // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. №. 1. С. 21–29.

13. Логвина К.А. Активация вяжущих свойств электросталеплавильных шлаков ОАО «Белорусский металлургический завод» // Образование. Наука. Производство. 2018. С. 1569–1573.

14. Голосова А.С., Клименко Н.Н., Делицын Л.М. Влияние вида щелочного активатора на структуру и механические свойства композиций на основе отходов ТЭК // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. №. 4 (214). С. 51–53.

15. Калашников В.И. Активация малоактивных отвальных шлаков для получения композиционных бесклнкерных минеральношлаковых вяжущих // Современные проблемы науки и образования. 2015. №. 2. С. 8.

16. Якубов Д.А. Геосинтез строительных материалов путем щелочной активации гранулированного доменного шлака // Развитие науки и техники механики выбора и реализации приоритетов, 2022. 162 с.

17. Bol'shakov V.I., Scherbak S.A., Eliseeva M.A. Increasing the reactivity of blast-furnace granulated slag // Construction, materials science, mechanical engineering. 2010. №. 59. 34–38 p. (rus)

18. Щербак С.А., Елисеева М.А., Калинин Н.В. Характеристика шлаков и их активация // Вестник Преднепровской государственной академии строительства и архитектуры. 2009. №. 11 (140). С. 4–8.

19. Артамонова А.В. Вяжущие вещества на основе шлаков электросталеплавильного производства // Строительные материалы. 2011. №. 5. С. 11–13.

20. Смирнова О.М., Казанская Л.Ф. Гибридные цементы на основе гранулированных доменных шлаков основные направления исследований // Эксперт: теория и практика. 2022. №. 3 (18). С. 59–65. DOI:10.51608/26867818_2022_3_59.

21. Строкова Я.А., Клименко Н.Н. Комплексная щелочно-щелочноземельная активация гранулированного доменного шлака // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. №. 4 (214). С. 130–132.

22. ОДМ 218.6.1.005-2021 «Методических рекомендаций по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации». Взамен «Методических рекомендаций по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации», утвержденных распоряжением Росавтодора № ОС-568-р от 27.06.2002. : введ. 2021-02-17. М.: Изд-во стандартов, 2021. 24 с.

23. ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 01.03.2020. М: СтандарИнформ: Изд-во стандартов, 2020. 15 с.

24. ГОСТ 23732 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Введ. 01.10.2012. М: СтандарИнформ: Изд-во стандартов, 2012. 11 с.

25. ГОСТ 30744 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. Введ. 01.03.2002. М: СтандарИнформ: Изд-во стандартов, 2002. 29 с.

26. ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. Введ. 01.01.1999. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999. 37 с.

Информация об авторах

Траутвайн Анна Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: trautvain@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Тимофеев Даниил Геннадьевич, магистрант кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: daniil_timofeev_99@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

Поступила 02.10.2022 г.

© Траутвайн А.И., Тимофеев Д.Г., 2023

Trautvain A.I., *Timofeev D.G.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: daniil_timofeev_99@mail.ru

DEVELOPMENT OF VARIOUS TYPES OF CEMENTS FOR THE DEVICE OF STRUCTURAL LAYERS OF ROAD PAVEMENT BASED ON ASPHALT GRANULAR CONCRETE MIXTURES

Abstract. Today, the highway is not just a construction site, but also an important component in the structure of the country's economic development. Recently, transport loads on the structural layer of pavement have increased many times over as a result of an increase in freight turnover on the roads of the automobile network. To maintain the operational reliability of roads and extend their life cycle, high-quality and innovative materials are needed, technological modes of work adapted to them, as well as timely laboratory research, quality control and monitoring of materials being developed. This will improve the physical and mechanical properties of materials used in the construction of pavement structural layers. One effective approach is to reinforce the pavement base using cement based asphalt granular concrete mix (AGC), which involves the recycling of local materials instead of expensive stone materials. In the work, studies are carried out on the effect of a binder based on NLMK PJSC granulated blast-furnace slag, modified with various chemical additives, on the physical and mechanical properties of the asphalt granular concrete mixture. The effectiveness of the developed compositions lies in the fact that the slag becomes more hydraulically reactive not as a result of activation with caustic alkali or other low-modulus soluble silicates, but due to the use of special reagents that do not adversely affect process equipment and workers. Moreover, the annual growth of carbon dioxide emissions into the atmosphere in the production of cement expands the need for the use of alternative types of binders in construction. It has been established that samples of AGBS-K type asphalt-granular concrete mixture based on the developed compositions of an inorganic binder exceed the strength characteristics of composites using cement.

Keywords: asphalt granular concrete mix (AGB), structural layers of pavement, Portland cement, activation, granulated blast-furnace slag.

REFERENCES

1. Evstegneeva V.N., Stepanets V.G. Repair and reconstruction of asphalt concrete pavements by cold recycling [Remont i rekonstrukciya asfal'tobetonnih pokrytij metodom holodnogo resajklinga]. Young scientist. 2017. No. 38. Pp. 21–28. (rus)
2. Zarapina L.S., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Influence of the properties of the material obtained by cold milling of non-rigid type coatings on the deformation of the layer during the construction of pavement [Vliyanie svojstv materiala, poluchaemogo pri holodnom frezerovanii pokrytij nezhestkogo tipa, na deformaciyu sloya pri ustrojstve dorozhnoj odezhdy]. Scientific Journal of Construction and Architecture. 2022. No. 1. Pp. 85–95. (rus) DOI:10.36622/VSTU.2022.65.1.008.
3. Yarmolinsky V.A., Zhabkin M.O., Yarmolinskaya E.V. Study of the optimal amount of binder when strengthening asphalt granular concrete [Issledovanie optimal'nogo kolichestva vyazhushchego pri ukreplenii asfal'togranulobetona]. International collection of scientific papers. 2020 Issue 20. Pp. 305–313. (rus)
4. Kobtsev D.V., Kobushko E.A. Asphaltogranulate – a promising material in road construction [Asfal'togranulyat – perspektivnyj material v dorozhnom stroitel'stve]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU V.G. Shukhov. 2017. Pp. 2125–2131. (rus)
5. Karpenko S.A. To the question of the practical application of modern materials and structures in the road sector [K voprosu prakticheskogo primeneniya sovremennyh materialov i konstrukcij v dorozhnom hozyajstve]. Modern applied research. 2019. Pp. 121–125. (rus)
6. Shiryashkina D.R. The use of local building materials and secondary products of production to strengthen the roadsides of regional roads [Ispol'zovanie mestnyh stroitel'nyh materialov i vtorichnyh produktov proizvodstva dlya ukrepleniya obochin regional'nyh dorog]. Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Volgograd, 2021, Pp. 168–171. (rus)
7. Bagrov I.A., Yagunov A.A., Dudin V.M. Selection of the composition of the asphalt granular concrete mixture for the repair of road pavements by the method of cold regeneration [Podbor sostava asfal'togranulobetonnoj smesi pri remonte pokrytij avtomobil'nyh dorog metodom holodnoj regeneracii]. Proceedings of the International (correspondence) scientific and practical conference. Vydavatel "Osviceni", Scientific Publishing Center "World of Science". Neftekamsk, 2021. Pp. 25–28. (rus)
8. Borovik N.S., Zhuravlev D.V. Regeneration of pavement by cold recycling [Regeneraciya

dorozhnoj odezhdoy metodom holodnogo resaj-klinga]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. Pp. 2021–2025. (rus)

9. Grilli A., Bocci M., Tarantino A.M. Experimental investigation on fibre-reinforced cement-treated materials using reclaimed asphalt. *Construction and Building Materials*. 2013. Pp. 491–496.

10. One L., Tjaronge M.W., Irmawaty R., Hus-
tim M. Effect of portland composite cement and
buton granular asphalt on indirect tensile strength of
emulsified asphalt cold mix using limestone aggre-
gate. *IOP Conference Series: Earth and Environmen-
tal Science* 419(1).

11. Potturi A. Evaluation Of Resilient Modulus
Of Cement And Cement-fiber Treated Reclaimed
Asphalt Pavement (RAP). *Conference Series: Earth
and Environmental Science* 423(1).

12. Nakhaev M.R., Salamanova M.Sh., Is-
mailova Z.Kh. Patterns of the processes of formation
of the structure and strength of a clinker-free binder
of alkaline activation [Zakonomernosti protekaniya
processov formirovaniya struktury i prochnosti besk-
linkernogo vyazhushchego shchelochnoj aktivacii].
Building materials and products, 2020. Vol. 3. No.
1. Pp. 21–29. (rus)

13. Logvina K. A. Activation of binding prop-
erties of electric steel-smelting slags of JSC "Belar-
ussian Metallurgical Plant" [Aktivaciya vyazhush-
chih svojstv elektrastaleplavil'nyh shlakov OAO"
Belorusskij metallurgicheskij zavod"]. *Education.
The science. Production*. 2018. Pp. 1569–1573. (rus)

14. Golosova A.S., Klimenko N.N., Delitsyn
L.M. Influence of the type of alkaline activator on
the structure and mechanical properties of composi-
tions based on fuel and energy waste [Vliyanie vida
shchelochnogo aktivatora na strukturu i mekhanich-
eskie svojstva kompozicij na osnove othodov TEK].
Successes in chemistry and chemical technology.
2019. Vol. 33. No. 4 (214). Pp. 51–53. (rus)

15. Kalashnikov V.I. Activation of low-active
dump slags for obtaining composite clinker-free
mineral slag binders [Aktivaciya maloaktivnyh ot-
val'nyh shlakov dlya polucheniya kompozicionnyh
besklinkernykh mineral'noshlakovykh vyazhushchih].
Modern problems of science and education. 2015.
No. 2. Pp. 8. (rus)

16. Yakubov D.A. Geosynthesis of building
materials by alkaline activation of granulated blast-
furnace slag [Geosintez stroitel'nykh materialov
putem shchelochnoj aktivacii granulirovannogo
domennogo shlaka]. *Development of science and
technology in the mechanics of choice and imple-
mentation of priorities*, 2022. 162 p. (rus)

17. Bol'shakov V.I., Scherbak S. A., Eliseeva
M. A. Increasing the reactivity of blast-furnace gran-
ulated slag. *Construction, materials science, me-
chanical engineering*. 2010. No. 59. Pp. 34–38. (rus)

18. Shcherbak S.A., Eliseeva M.A., Kali-
nichenko N.V. Characteristics of slags and their ac-
tivation [Harakteristika shlakov i ih aktivaciya]. *Bul-
letin of the Predneprovsk State Academy of Con-
struction and Architecture*. 2009. No. 11 (140). Pp.
4–8. (rus)

19. Artamonova A.V. Binders based on slags of
electric steelmaking production [Vyazhushchie
veshchestva na osnove shlakov el-
ektrostaleplavil'nogo proizvodstva]. *Building mate-
rials*. 2011. No. 5. Pp. 11–13. (rus)

20. Smirnova O.M., Kazanskaya L.F. Hybrid
cements based on granulated blast-furnace slags,
main areas of research [Gibridnye cementy na os-
nove granulirovannykh domennykh shlakov osnovnye
napravleniya issledovaniy]. *Expert: theory and prac-
tice*. 2022. No. 3 (18). Pp. 59–65. (rus)
DOI:10.51608/26867818_2022_3_59.

21. Stokova Ya.A., Klimenko N.N. Complex
alkaline-alkaline earth activation of granulated blast-
furnace slag [Kompleksnaya shchelochno-shche-
lochnozemel'naya aktivaciya granulirovannogo
domennogo shlaka]. *Advances in chemistry and
chemical technology*. 2019. Vol. 33. No. 4 (214). Pp.
130–132. (rus)

22. ODM 218.6.1.005-2021 "Methodological
recommendations for the restoration of asphalt con-
crete pavements and bases of roads using cold regen-
eration methods." - Instead of the "Methodological
recommendations for the restoration of asphalt con-
crete pavements and bases of roads by cold regen-
eration methods", approved by the order of the Federal
Road Traffic Agency No. OS-568-r dated
06.27.2002. : input 2021-02-17. M.: Publishing
House of Standards, 2021. 24 p. (rus)

23. GOST 31108-2020 General construction
cements. Specifications. Enter. 03.01.2020. M:
StandarInform: Publishing house of standards, 2020.
15 p. (rus)

24. GOST 23732 Water for concrete and mor-
tar. Specifications. Enter. 01.10.2012. M: StandarIn-
form: Publishing house of standards, 2012. 11 p.
(rus)

25. GOST 30744 Cements. Test methods using
polyfractional sand. Enter. 03.01.2002. M:
StandarInform: Publishing house of standards, 2002.
29 p. (rus)

26. GOST 12801-98. Materials based on or-
ganic binders for road and airfield construction. Test
methods. Enter. 01.01.1999. M: StandarInform: Pub-
lishing house of standards, 1999. 37 p. (rus)

Information about the authors

Trautvain, Anna I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile and Railways. E-mail: trautvain@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Timofeev, Daniil G. Undergraduate of the Department of Automobile and Railways. E-mail: daniil_timofeev_99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 02.10.2022

Для цитирования:

Траутвайн А.И., Тимофеев Д.Г. Разработка различных видов цементов для устройства конструктивных слоев дорожной одежды на основе асфальтогранулобетонных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-34-45

For citation:

Trautvain A.I., Timofeev D.G. Development of various types of cements for the device of structural layers of road pavement based on asphalt granular concrete mixtures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 34–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-34-45

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-46-54

***Поваров А.В., Трушин Ю.Е.**Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова

*E-mail: povarov-av2012@yandex.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ СТЕН МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ ВТОРИЧНОГО ЖИЛИЩНОГО ФОНДА Г. САРАТОВА

Аннотация. Техническое состояние многих многоквартирных домов вторичного жилищного фонда г. Саратова, построенных с 1977 г. по 1999 г., не соответствует действующим нормативным требованиям в области создания оптимальных параметров микроклимата помещений. Система наружной теплоизоляции «мокрого» типа с жестким креплением утеплителя является очень распространенной для утепления наружных стен данных домов. Установлено, что по причине незаполненности раствором швов каменной кладки и ее неровностей, заниженной толщины утеплителя, тонкого слоя защитного слоя штукатурки, а также нарушения технологии монтажа системы теплоизоляции образуются зазоры между плитами утеплителя и стенами, появляется доступ холодного воздуха к каменной кладке стен, что приводит к появлению конденсата, промерзанию стен, увеличению влажности и снижению температуры внутреннего воздуха в квартирах. Проникновение холодного воздуха через стены приводит к повышенным теплопотерям, охлаждению массива каменной кладки и смещению «точки росы». В результате приборного обследования домов было установлено, что промерзание увлажненных утепленных стен приводило к увеличению их теплопотерь на 10–20 %. Исследована альтернативная система точечной теплоизоляции, в которой плиты утеплителя крепятся к стене с помощью шарнирных крепежных элементов, исключая деформацию и разрушение слоя защитной штукатурки толщиной 10–20 мм и утеплителя. Определена оптимальная толщина утеплителя марки ПСБ-С 25 для климатических условий г. Саратова. Была усовершенствована технология монтажа подвижной системы теплоизоляции с применением грунтовки глубокого проникновения и клея для нанесения на плиты утеплителя, что позволяет уменьшить массу конструкции и снизить стоимость выполнения монтажных работ. Показана эффективность применения подвижной системы теплоизоляции для повышения энергоэффективности многоквартирных домов вторичного жилищного фонда в климатических условиях г. Саратова.

Ключевые слова: параметры микроклимата, теплопотери, система теплоизоляции, теплоизоляционный материал, технология монтажа.

Введение. Многие многоквартирные дома вторичного жилищного фонда г. Саратова, построенные с 1977 года по 1999 год, не имеют надлежащей системы теплоизоляции ограждающих конструкций, в частности, наружных стен [1, 2]. В данных жилых домах нарушена основная функция энергоэффективного здания, заключающаяся в обеспечении оптимального микроклимата помещений квартир [3, 4].

В отопительный период года происходят большие теплопотери, снижение температуры внутренней поверхности стен и внутреннего воздуха в квартирах домов. Собственники квартир многих домов вынуждены прибегнуть к устройству наружной «точечной» теплоизоляции «мокрого» типа с жестким креплением утеплителя (рис. 1) [1]. После 2–3 лет эксплуатации данной системы теплоизоляции в управляющие компании стали поступать жалобы на отсыревание утепленных стен и образование плесени внутри квартир [1, 5].

Методы и материалы. Проводились исследования для выяснения причин появления конденсата, увлажнения и промерзания наружных кирпичных стен нескольких многоквартирных домов вторичного жилищного фонда г. Саратова, защищенных наружной теплоизоляцией «мокрого» типа с жестким креплением утеплителя.

Наружные стены исследуемых домов по проекту выполнены из силикатного кирпича толщиной 520 мм (510 мм – толщина кладки в 2 кирпича и слой штукатурки – 10 мм).

Визуальный осмотр и инструментальный контроль утепленных участков стен позволил выявить следующие отклонения от проектных решений в системе теплоизоляции:

1 – наружная поверхность стен имеет случаи «пустошовки», с незаполненностью раствором швов каменной кладки от 50 до 150 мм;

2 – неровности каменной кладки с перепадами от 5 до 8 мм, в результате чего плиты пенопласта (установленного в качестве утеплителя) неплотно примыкают к стене, образуя воздушные пустоты;

3 – заниженная толщина утеплителя пенопласта марки ПС-1 плотностью 25 кг/м³ – 50 мм;

4 – заниженная толщина защитного слоя штукатурки, составившая от 1,5 до 2 мм (рис. 2);

5 – отслаивание штукатурки и оголение утеплителя, что происходит по причине постоянного намокание торцевой части теплоизоляции и разрушения клеевой основы.



Рис. 1. Теплоизоляция «мокрого» типа наружных стен кирпичных домов в г. Саратове

Вследствие малой толщины защитной штукатурки масса холодного наружного воздуха под воздействием ветра инфильтрируется в швы плит утеплителя, а далее поступая в имеющиеся воздушные прослойки между каменной стеной и

утеплителем, вызывает дополнительное охлаждение наружной стены здания. Данное обстоятельство является основной причиной появления конденсата на откосах и внутренней поверхности стен квартир.

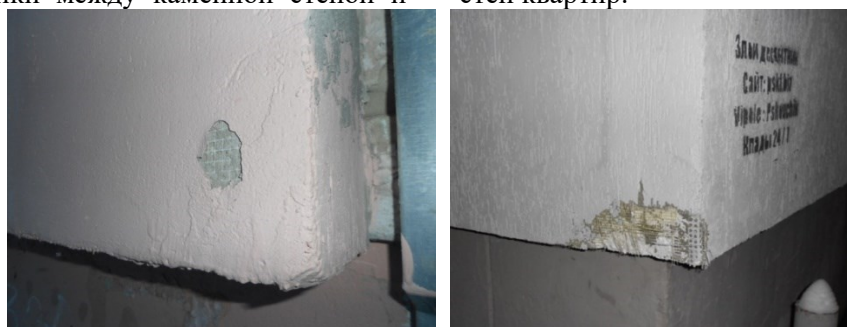


Рис. 2. Повреждения защитного тонкого слоя штукатурки системы теплоизоляции. Обнажение утеплителя

Наличие «пустошовки» в наружных кирпичных стенах обследуемых домов также сильно снижает уровень их тепловой защиты. Данное обстоятельство связано со значительной разницей сопротивлений воздухопроницанию имеющейся каменной кладки и кладочного раствора,

поскольку кирпичные стены на кладочном растворе толщиной 52 см имеют малую величину сопротивления воздухопроницанию [6, 7]. В результате инфильтрации большое количество холодного воздуха возникает ряд неблагоприятных теплоэнергетических и санитарно-гигиенических факторов, проявляющихся в виде повышенных

тепловых потерь, охлаждения массива кладки и смещения плоскости конденсации водяного пара в сторону к внутренней поверхности ограждающих конструкций [1, 8, 9].

Приборное обследование домов проводилось в январе 2022 г. с помощью тепловизора «Testo 875-1», пирометра «ADA TemPro 550», измерителя параметров микроклимата «МЕТЕО-СКОП - М». Для определения условий возникновения точки росы на ограждающих конструкциях

(стенах) температура поверхности измерялась с помощью термометра контактного цифрового ТК-5.03, в труднодоступных местах применялся пирометр инфракрасный С-110. Влажность материала стен определялась влагомером МГ4У. Замерялись относительная влажность воздуха в помещениях квартир, температура внутренней поверхности утепленных стен и определялась температура точки росы (табл. 1).

Таблица 1

Результаты обследования утепленных стен многоквартирных жилых домов

Наименование параметра	Стена каменная из силикатного кирпича					Окна ПВХ				
Влажность воздуха, ϕ (%)	74	77,5	75	79	80	74	75	75	72	73
Температура точки росы, $t_{т.р.}$ (°C)	5,3	4,5	5,1	5,4	5,0					
Температура наружной поверхности, $t_{н.п.}$ (°C)	-7,0	-7,9	-8,1	-7,7	-8,0	-7,7	-7,6	-7,8	-7,5	-7,9
Температура внутренней поверхности, $t_{в.п.}$ (°C)	19,5	19,3	19,1	19,0	19,2	17,1	17,3	17,8	17,0	17,7
Температура наружного воздуха, $t_{н.}$ (°C)	-2,0	-1,9	-2,2	-2,3	-1,8	-2,0	-2,1	-1,9	-2,2	-2,1
Температура внутреннего воздуха, $t_{в.}$ (°C)	20,7	20,4	20,5	20,7	20,5	20,4	20,8	21,1	20,2	21,2
Плотность теплового потока, $q_{т.п.}$ (Вт/м ²)	26,5	26,8	24,8	25,0	25,8	48,8	48,7	49,1	48,5	49,3
Фактическое значение сопротивления теплопередаче, R (м ² ·°C/Вт)	2,15	2,20	2,21	2,16	2,15	0,5	0,48	0,5	0,47	0,5
Среднее фактическое значение сопротивления теплопередаче, $R_{ср.}$ (м ² ·°C/Вт)	2,17					0,49				
Нормируемое сопротивление теплопередаче, R_n (м ² ·°C/Вт)	3,04					0,53				

Месторасположение в квартирах пластиковых окон из двойных стеклопакетов вровень с наружной поверхностью утепленной стены, имеющей «пустошовку», также привело к тому, что охлажденный в период отрицательных температур массив каменной кладки остается с внутренней стороны откосов оконного проема. Данное явление, в свою очередь, приводило к снижению температуры откосов до температуры точки росы и вызывало выпадение конденсата на их поверхностях. Большая воздухопроницаемость наружных каменных стен обследованных зданий и повышенная герметичность оконных стеклопакетов привели к воздухообмену, являющемуся неконтролируемым, и влекущему за собой существенное ухудшение внутреннего микроклимата помещений квартир.

С целью изучения воздействия климатических факторов на температурно-влажностные характеристики и воздухопроницаемость наружных ограждающих конструкций жилых домов

был проведен анализ климатограмм для Саратовского региона 2-го климатического района. Проведенный на основании СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» анализ показал, что на территории г. Саратова в январе разница между средней и максимальной температурами составляет 13 °C, а упругость водяного пара в наружном воздухе в 9 раз меньше, чем в воздухе помещений [1]. Отмечаются значительные колебания амплитуды температуры наружного воздуха и упругостей водяного пара воздушных сред по обе стороны стен жилых зданий. Данное обстоятельство также указывает на интенсивную передачу и накопление парообразной влаги в толще ограждающих конструкций рассматриваемых домов. Также существует возможность фазовых переходов влаги в структуре материала ограждающих конструкций со стороны их наружной утепленной поверхности [10, 11, 12].

Установлено, что под действием отрицательных температур увлажненные стены подвергались промерзанию на определенную толщину,

после чего влага испарялась и конденсировалась на внутреннюю поверхность стен. Данное явление приводило к изменению теплофизических параметров силикатного кирпича (кирпич увлажнялся), теплового баланса и снижению энергоэффективности наружной стены дома, а теплопотери утепленных стен домов оказались выше нормативных значений на 10–20 % [6].

Проведено сравнение сопротивления теплопередаче увлажненных наружных каменных стен из силикатного кирпича без учета их промерзания R и с учетом промерзания $R_{пр}$ для расчетного значения коэффициента теплопроводности λ_3 (полученного по нормативным значениям) при определении тепловых потерь через 1 м² стены [1]. Расхождение тепловых потерь через наружную кирпичную стену с учетом и без учета промерзания относительно расчетного коэффициента теплопроводности составили 22 % [6].

Нанесение более толстого слоя защитной штукатурки до 10–20 мм с целью уменьшения инфильтрации воздуха через стены приведет к утяжелению и неизбежной деформации, а за тем и разрушению самой системы теплоизоляции «мокрого» типа.

Помимо рассмотренной системы теплоизоляции с жестким креплением утеплителя была исследована более эффективная современная система, в которой плиты теплоизоляционного материала крепятся к стене механическим путем с помощью шарнирных крепежных элементов, за счет чего вся система теплоизоляции может беспрепятственно перемещаться вдоль утепляемой стены здания (рис. 3). Таким образом, исключается передача осадочных деформаций (рис. 4) на отделочный слой штукатурки; температурное воздействие и ветровые нагрузки на поверхность толстого слоя штукатурки (до 20 мм) не передается на стены здания; в штукатурке не возникают напряжения, которые могли бы привести к разрушению и образованию трещин.

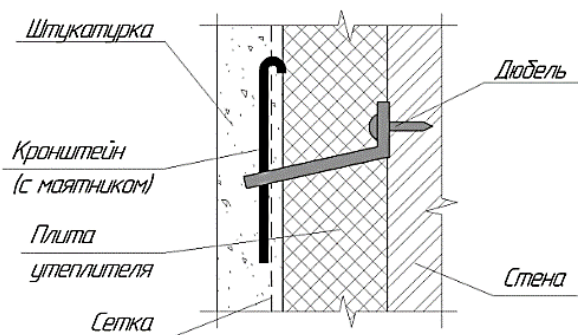


Рис. 3. Схема системы теплоизоляции с подвижными элементами крепления утеплителя

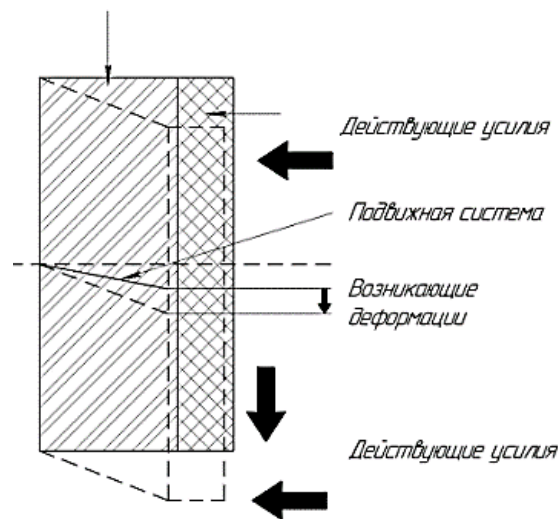


Рис. 4. Схема действующих усилий от системы теплоизоляции с подвижными элементами крепления утеплителя

Основная часть. При определении необходимой толщины теплоизоляционного материала для системы теплоизоляции с подвижными элементами крепления утеплителя в теплотехнических расчетах была принята следующая конструкция стен исследуемых многоквартирных домов г. Саратова [6, 13, 14]:

- штукатурка с внутренней стороны стен – $\delta_{шт}=0,01$ м. Коэффициент теплопроводности штукатурки $\lambda_{шт}=0,87$ Вт/(м·°С);

- наружные кирпичные стены (по проекту) – $\delta_n=0,510$ м. Коэффициент теплопроводности каменной стены из сплошного силикатного кирпича составляет $\lambda_n=0,93$ Вт/(м·°С) [1];

- коэффициенты теплоотдачи поверхностей кирпичных стен: внутренней – $\alpha_v = 8,7$ Вт/(м·°С), наружной – $\alpha_n = 23$ Вт/(м·°С);

- утеплитель экструдированный пенополистерол марки ПСБ-С 25 плотностью 25 кг/м³, толщиной $\delta_{ут}=?$, с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ут}=0,039$ Вт/(м·°С) [2, 4] и полностью соответствующий нормативным требованиям, предъявляемым к теплоизоляции «мокрого» типа [5, 14, 15];

- штукатурка с наружной стороны стен по утеплителю толщиной $\delta_{шт.н}=0,02$ м с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{шт.н}=0,87$ Вт/(м·°С) [1, 2].

Требуемое сопротивление теплопередаче, (м²·°С)/Вт:

$$R_{тр} = \frac{(t_b - t_{н.х}) \cdot n}{\Delta t^n \cdot \alpha_b} = \frac{(20 - (-24)) \cdot 1}{4 \cdot 8,7} = 1,26 \quad (1)$$

где t_b – расчетная температура внутреннего воздуха в квартирах домов, °С: $t_b = 20$ °С;

$t_{н.х}$ – расчетная зимняя температура, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92, °С: $t_{н.х} = -24$ °С (СП 131.13330.2020 «Строительная климатология»);

Δt^H – нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, °C. Для наружных стен жилых зданий $\Delta t^H = 4$ °C.

$$GCOП = (t_B - t_H) \cdot n_{от} = (20 - (-3,2)) \cdot 189 = 4385 \quad (2)$$

t_H – средняя температура наружного воздуха °C: $t_H = -3,2$ °C (СП 131.13330.2020);

$n_{от}$ – продолжительность отопительного периода в г. Саратове, сут./год: $n_{от} = 189$ сут./год (СП 131.13330.2020).

На основании $GCOП = 4385$ °C·сут. нормируемое значение сопротивления теплопередаче

$$\delta_{ут} = \left[R_o^{норм} - \left(\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{ш.н}}{\lambda_{ш.н}} + \frac{1}{\alpha_n} \right) \right] \cdot \lambda_{ут} =$$

$$= [3,04 - \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,01}{0,87} + \frac{0,51}{0,93} + \frac{0,02}{0,87} + \frac{1}{23} \right)] \cdot 0,039 = 0,09 \quad (3)$$

Уточнение общего фактического сопротивления теплопередаче R_o^ϕ для всех слоев

$$R_o^\phi = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{ш.н}}{\lambda_{ш.н}} + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,01}{0,87} + \frac{0,51}{0,93} + \frac{0,02}{0,87} + \frac{0,09}{0,039} + \frac{1}{23} = 3,04 \quad (4)$$

Таким образом, выполняется условие $R_o^\phi \geq R_o^{норм}$.

Передаваемая через наружные каменные стены домов средняя за отопительный период тепловая мощность составляет, Вт [2, 16, 17]:

$$Q_{ср.м} = (t_B - t_H) \cdot \frac{F}{R_{ср}} \quad (5)$$

где F – площадь теплоизолируемых стен дома, м².

Общая площадь теплоизолируемых стен определена на примере одного типового подъезда жилого дома за вычетом оконных проемов, балконов и лоджий.

Расчеты проведены для двух вариантов:

– каменная стена дома без наружной теплоизоляции;

– каменная стена дома после проведения теплоизоляции.

$$\Delta Q = 0,86 \cdot 10^{-3} (Q_{ср.м.1} - Q_{ср.м.2}) \cdot n_{от} \cdot n_{ч} = 0,86 \cdot 10^{-3} (19,126 - 5,159) \cdot 189 \cdot 24 = 54,48 \quad (6)$$

где $n_{ч}$ – время работы системы отопления в течение суток, ч/сут.

Годовая экономия от энергосберегающих мероприятий, руб./год:

$$\Delta C = \Delta Q \cdot T_{т.э} = 54,48 \cdot 1780,54 = 97004 \quad (7)$$

где $T_{т.э}$ – тариф на тепловую энергию, руб./Гкал. Тариф на тепловую энергию от ПАО «Т Плюс» г. Саратов с 1 января 2022 г. составил 1780,54 руб./Гкал.

Количество градусо-суток отопительного периода в год, °C·сут:

наружных стен жилых домов составило $R_o^{норм} = 3,04$ (м²·°C)/Вт. После сравнения $R_{тр} = 1,26$ (м²·°C)/Вт и $R_o^{норм} = 3,04$ (м²·°C)/Вт для дальнейших расчетов принято большее значение $R_o^{норм}$.

Предварительная толщина утеплителя пенополистерола марки ПСБ-С 25 составила, м:

ограждающей конструкции при толщине утеплителя $\delta_{ут} = 0,09$ м, (м²·°C)/Вт:

Сопротивление теплопередаче для не утепленной стены из силикатного кирпича составило $R_{ср} = 0,82$ (м²·°C)/Вт.

Передаваемая через наружные неутепленные каменные стены подъезда дома средняя за отопительный период тепловая мощность составила, Вт:

$$Q_{ср.м.1} = (20 - (-3,2)) \cdot \frac{676}{0,82} = 19126$$

Нормируемое значение сопротивления теплопередаче каменной стены $R_o^{норм} = 3,04$ (м²·°C/Вт), поэтому передаваемая через наружные теплоизолированные каменные стены подъезда дома средняя за отопительный период тепловая мощность составила, Вт:

$$Q_{ср.м.2} = (20 - (-3,2)) \cdot \frac{676}{3,04} = 5159 \text{ Вт}$$

В результате проведения мероприятий по эффективной теплоизоляции экономия тепловой энергии одним подъездом дома за отопительный период составила, Гкал/год, [18, 19]:

На основании полученных результатов была усовершенствована технология монтажа системы теплоизоляции «мокрого» типа с подвижными элементами крепления утеплителя к стенам дома:

1 – очистка поверхности стен от загрязнений;

2 – заполнение пустот в каменной кладке цементно-песчаным раствором марки М 300 до стадии зачеканки;

3 – выравнивание стен слоем штукатурки толщиной 5–10 мм;

4 – нанесение на штукатурку грунтовки глубокого проникновения Ceresit СТ 17 слоем 0,5 мм;

5 – крепление неподвижной части кронштейнов к стене с помощью дюбелей;

6 – крепление снизу-вверх плит утеплителя пенополистерола марки ПСБ-С-25 на подвижную часть кронштейнов. Особое внимание следует уделить плотному (без образования пустот) примыканию плит утеплителя к поверхности стены и к друг другу. Небольшие зазоры между плитами утеплителя необходимо заполнить мастикой на основе пенополиуретана с помощью шприц-туба;

7 – нанесение грунтовки глубокого проникновения Ceresit СТ 17 и клея Ceresit СТ-85 на поверхность теплоизоляционных плит;

8 – монтаж армирующей полимерной сетки;

9 – нанесение двух слоев защитной штукатурки (общая толщина слоев может быть до 15–20 мм) с монтажом армирующей полимерной сетки между двумя последовательно нанесенными слоями штукатурки;

10 – нарезка горизонтальных и вертикальных деформационных швов шириной 6 мм с шагом по длине стены не более 5 м;

11 – заделка швов силиконовой мастикой;

12 – нанесение декоративной краски слоем 0,5 мм.

Усовершенствованная технология основана на применении грунтовки глубокого проникновения Ceresit СТ 17, которой осуществляется пропитка плит пенополистерола, чем достигается его упрочнение и повышение паропроницаемости [20]. Таким образом, поверхность плит утеплителя имеет большую адгезирующую способность, что позволяет закреплять армирующую сетку одним слоем клеевого состава, уменьшающим общую массу утепляющей системы, и снижающей стоимость выполнения работ.

Применение системы теплоизоляции «мокрого» типа с гибкими элементами крепления утеплителя повысит энергоэффективность жилых домов вторичного жилищного фонда г. Саратова, сократит затраты на тепловую энергию и улучшит показатели микроклимата помещений квартир.

Снижение энергопотребления жилого многоквартирного дома связано со значительным экологическим эффектом, поскольку потребуются меньшее количество природного газа для работы отопительных котельных, а значит, снизится количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу города.

Выводы

1. Установлено, что увлажнение кирпичных стен ряда многоквартирных домов г. Саратова, утепленных с помощью «точечной» теплоизоляции «мокрого» типа, происходит, во-первых, из-за нарушения технологии монтажа системы теплоизоляции, во-вторых, по причине заниженной толщины утеплителя пенопласта марки ПС-1.

2. Принята для монтажа система теплоизоляции с подвижными элементами крепления утеплителя пенополистерола марки ПСБ-С 25 толщиной 90 мм с учетом климатических условий г. Саратова.

3. Усовершенствована технология монтажа энергосберегающей системы теплоизоляции к стенам дома, которая уменьшает потери тепла и количество требуемой тепловой энергии от источника теплоснабжения с целью обеспечения нормативных показателей микроклимата в квартирах. Данные мероприятия напрямую влияют на уменьшение затрат на отопление домов вторичного жилищного фонда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдразаков Ф.К., Поваров А.В. Исследования причин переувлажнения утепленных фасадов многоквартирных домов г. Саратова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 39–45.

2. Гнездилова О.А., Разаков М.А., Чернова Р.В. Энергосбережение в жилых многоквартирных домах // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. № 6 (210). С. 78–81.

3. Крахина В.А., Кононенко В.В. Экономические аспекты энергосбережения и энергоэффективности в строительстве // Теоретическая экономика. 2018. №3 (45). С.81–88.

4. Дюрменова С.С., Махов А.Ю. Пути повышения энергоэффективности в зданиях [Электронный ресурс]. Молодой ученый. 2020. № 31 (321). С. 18–21. URL: <https://moluch.ru/archive/321/72917/> (дата обращения: 06.12.2022).

5. Касьянов В.Ф., Козлов А.С. Энергосберегающие технологии в архитектурно-планировочных решениях при строительстве, реконструкции и технической эксплуатации жилых зданий // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. №3 (1003). С. 41–43.

6. Поваров А.В., Бирюкова К.Ш. Исследование системы теплоизоляции «мокрого» типа с целью определения ее недостатков // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы XI Национальной конференции с международным участием. Под ред. А.Н. Никишанова. Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. 2021. С. 44–46.

7. Грибач Ю.С., Грибач Д.С., Поддаева О.И. Сравнительный анализ результатов расчета инфильтрационных потерь на примере жилого здания в г. Москве // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2018. № 2. С. 63–72. DOI:10.32464/2618-8716-2018-1-2-52-62
8. Агаханова К.М., Тертичник Е.И. О методике расчета фильтрационных потоков воздуха в квартирах секции многоэтажного жилого здания // Научное обозрение. 2017. № 11. С. 19–24.
9. Caesar Abi Shdid, Chadi Younes. Validating a new model for rapid multidimensional combined heat and air infiltration building energy simulation // Energy and Buildings. 2015. Vol. 87. № 1. Pp. 185–198. DOI: /10.1016/j.enbuild.2014.11.038
10. Rudnik K, Kacprzak D. Fuzzy TOPSIS method with ordered fuzzy numbers for flow control in a manufacturing system // Applied Soft Computing. 2017. Vol. 52. Pp. 1020–1041. DOI:10.1016/j.asoc.2016.09.027
11. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks // Magazine of Civil Engineering. 2016. №. 64 (4). Pp. 10–25. DOI:10.5862/MCE.64.2
12. Кривошеин А.Д. Обеспечение регулируемого притока воздуха в жилых зданиях: проблемы и решения // АВОК. 2018. №4. С. 32–38.
13. Чулков А.А. Исследование теплозащитных характеристик двухслойных наружных стен зданий с прерывистым отоплением // Градостроительство и Архитектура. 2018. №4. С. 15–18. DOI:10.17673/Vestnik.2018.04.3
14. Гущин С.В., Семенов А.С., Шень Чхао. Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №5. С. 31–43. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-5-31-43
15. Бобрышев В.В. Основные способы утепления зданий, их достоинства и недостатки [Электронный ресурс]. Молодой ученый. 2018. № 47 (233). С. 31–34. URL: <https://moluch.ru/archive/233/54195/> (дата обращения: 06.12.2022).
16. Lai D., Karava P., Chen Q. Study of outdoor ozone penetration into buildings through ventilation and infiltration // Building and Environment. 2015. Vol. 93. Part 2. Pp. 112–118. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.06.015
17. Cheng P.L., Li X. Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou, China // Energy and Buildings. 2018. Vol. 164. Pp. 219–225. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.12.062
18. Brinks P., Kornadt O., Oly R. Air infiltration assessment for industrial buildings // Energy and Buildings. 2015. Vol. 86. Pp. 663–676. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.10.040
19. Деркач В.Н., Демчук И.Е., Орлович Р.Б. Механизм повреждаемости несущей облицовки многослойных каменных стен // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №3 (54). С. 64–70. DOI: 10.18720/CUBS.54.5
20. Абдразаков Ф.К., Поваров А.В. Разработка технологии производства работ по монтажу оптимальной энергосберегающей системы теплоизоляции многоквартирного дома // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы X Национальной конференции с международным участием. Под ред. Ф.К. Абдразакова. Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. 2020. С. 13–17.

Информация об авторах

Поваров Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры гидромелиорации, природообустройства и строительства в АПК. E-mail: rovarov-av2012@yandex.ru. Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова. Россия, 410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3.

Трушин Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры гидромелиорации, природообустройства и строительства в АПК. E-mail: yura.trushin@yandex.ru. Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова. Россия, 410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3

Поступила 21.12.2022 г.

© Поваров А.В., Трушин Ю.Е., 2023

***Povarov A.V., Trushin Y.E.**

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov

*E-mail: povarov-av2012@yandex.ru

IMPROVEMENT OF THE THERMAL INSULATION SYSTEM WALLS OF APARTMENT BUILDINGS OF THE SECONDARY HOUSING OF THE CITY OF SARATOV

Abstract. The technical condition of many apartment buildings of the secondary housing stock in Saratov, built from 1977 to 1999, does not meet the current regulatory requirements in the field of creating optimal indoor climate parameters. The system of external thermal insulation of the "wet" type with a rigid fastening of the insulation is very common for the insulation of the external walls of these houses. It has been established that due to the fact that the masonry joints and its irregularities are not filled with mortar, the underestimated thickness of the insulation, a thin layer of the protective layer of plaster, as well as violations of the installation technology of the thermal insulation system, gaps are formed between the insulation plates and the walls, there is an access of cold air to the masonry of the walls, which leads to the appearance of condensate, freezing of walls, an increase in humidity and a decrease in the temperature of the indoor air in apartments. The penetration of cold air through the walls leads to increased heat loss, cooling of the masonry mass and a shift in the "dew point". As a result of the instrumental examination of houses, it is found that the freezing of moistened insulated walls led to an increase in their heat loss by 10-20%. An alternative system of point thermal insulation has been studied, in which the insulation boards are attached to the wall using hinged fasteners, excluding deformation and destruction of the protective plaster layer 10–20 mm thick and the insulation. The optimal thickness of the insulation brand PSB-S 25 for the climatic conditions of the city of Saratov is determined. The technology of mounting a movable thermal insulation system is improved using a deep penetration primer and glue for applying insulation to the plates, which makes it possible to reduce the mass of the structure and reduce the cost of installation work. The effectiveness of the use of a movable thermal insulation system to improve the energy efficiency of multi-apartment buildings of the secondary housing stock in the climatic conditions of Saratov is shown.

Keywords: microclimate parameters, heat losses, thermal insulation system, thermal insulation material, installation technology.

REFERENCES

1. Abdrazakov F.K., Povarov A.V. Studies of the causes of waterlogging of insulated facades of apartment buildings in Saratov [Issledovaniya prichin pereuvlazhneniya uteplennykh fasadov mnogokvartirnykh domov g. Saratova]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 3. Pp. 39–45. (rus)
2. Gnezdilova O.A., Razakov M.A., Chernova R.V. Energy saving in residential apartment buildings [Energoberezheniye v zhilykh mnogokvartirnykh domakh]. Plumbing, heating, air conditioning. 2019. No. 6 (210). Pp. 78–81. (rus)
3. Krakhina V.A., Kononenko V.V. Economic aspects of energy saving and energy efficiency in construction [Ekonomicheskiye aspekty energoberezheniya i energoeffektivnosti v stroitel'stve]. Teoreticheskaya ekonomika. 2018. No. 3 (45). Pp. 81–88. (rus)
4. Durmenova S.S., Makhov A.Yu. Ways to improve energy efficiency in buildings [Electronic resource] [Puti povysheniya energoeffektivnosti v zdaniyakh]. Young scientist. 2020. No. 31 (321). Pp. 18–21. URL: <https://moluch.ru/archive/321/72917/> (date of access: 06.12.2022). (rus)
5. Kasyanov V.F., Kozlov A.S. Energy-saving technologies in architectural and planning decisions in the construction, reconstruction and technical operation of residential buildings [Energoberegayushchiye tekhnologii v arkhitekturno-planirovochnykh resheniyakh pri stroitel'stve, rekonstruktsii i tekhnicheskoy ekspluatatsii zhilykh zdaniy]. BST: Bulletin of construction equipment. 2018. No. 3 (1003). Pp. 41–43. (rus)
6. Povarov A.V., Biryukova K.Sh. Study of the "wet" type thermal insulation system in order to determine its shortcomings [Sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva, teplogazosnabzheniya i energoobespecheniya]. Materialy XI Natsional'noy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Pod red. A.N. Nikishanova. Saratov: FGBOU VO Saratovskiy GAU. 2021. Pp. 44–46. (rus)
7. Gribach Yu.S., Gribach D.S., Poddaeva O.I. Comparative analysis of the results of calculation of infiltration losses on the example of a residential building in Moscow [Srvnitel'nyy analiz rezul'tatov rascheta infil'tratsionnykh poter' na primere zhilogo zdaniya v g. Moskve]. Power and energy equipment. Autonomous systems. 2018. No. 2. Pp. 63–72. DOI:10.32464/2618-8716-2018-1-2-52-62 (rus)
8. Agakhanova K.M., Tertchnik E.I. On the method of calculating air filtration flows in the apartments of a section of a multi-storey residential building [O metodike rascheta fil'tratsionnykh potokov

vozdukha v kvartirakh sektsii mnogoetazhnogo zhi-logo zdaniya]. Scientific Review. 2017. No. 11. Pp. 19–24. (rus)

9. Shdid C.A., Younes C. Validating a new model for rapid multidimensional combined heat and air infiltration building energy simulation. Energy and Buildings. 2015. Vol. 87. No 1. Pp. 185–198. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.038

10. Rudnik K., Kacprzak D. Fuzzy TOPSIS method with ordered fuzzy numbers for flow control in a manufacturing system. Applied Soft Computing. 2017. Vol. 52. Pp. 1020–1041. DOI:10.1016/j.asoc.2016.09.027

11. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 64 (4). Pp. 10–25. DOI:10.5862/MCE.64.2

12. Krivoshein A.D. Providing controlled air flow in residential buildings: problems and solutions [Obespecheniye reguliruyemogo pritoka vozdukha v zhilykh zdaniyakh: problemy i resheniya]. ABOK. 2018. No. 4. Pp. 32–38. (rus)

13. Chulkov A.A. Investigation of heat-shielding characteristics of two-layer outer walls of buildings with intermittent heating // Town-planning and Architecture. 2018. No. 4. Pp. 15–18. (rus) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.04.3

14. Gushchin S.V., Seminenko A.S., Shen Chhao. World trends in the development of energy-saving technologies [Mirovyye tendentsii razvitiya energosberegayushchikh tekhnologiy]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2020. No.5. Pp. 31–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-5-31-43 (rus)

15. Bobryshev V.V. The main methods of building insulation, their advantages and disadvantages [Osnovnyye sposoby utepleniya zdaniy, ikh

dostoinstva i nedostatki] [Electronic resource]. Young scientist. 2018. No. 47 (233). Pp. 31–34. URL: <https://moluch.ru/archive/233/54195/> (date of access: 12/06/2022). (rus)

16. Lai D., Karava P., Chen Q. Study of outdoor ozone penetration into buildings through ventilation and infiltration. Building and Environment. 2015. Vol. 93. Part 2. Pp. 112–118. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.06.015

17. Cheng P.L., Li X. Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou, China. Energy and Buildings. 2018. Vol. 164. Pp. 219–225. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.12.062

18. Brinks P., Kornadt O., Oly R. Air infiltration assessment for industrial buildings. Energy and Buildings. 2015. Vol. 86. Pp. 663–676. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.10.040

19. Derkach V.N., Demchuk I.E., Orlovich R.B. The mechanism of damage to non-bearing lining of multilayer stone walls [Mekhanizm povrezhdayemosti nenesushchey oblitsovki mnogosloynnykh kamennykh sten]. Construction of unique buildings and structures. 2017. No. 3 (54). Pp. 64–70. (rus) DOI: 10.18720/CUBS.54.5

20. Abdrazakov F.K., Povarov A.V. Development of a technology for the installation of an optimal energy-saving thermal insulation system for an apartment building [Razrabotka tekhnologii proizvodstva rabot po montazhu optimal'noy energosberegayushchey sistemy teploizolyatsii mnogokvartirnogo doma]. Sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva, teplogazosnabzheniya i energoobespecheniya: Materialy X Natsional'noy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Pod red. F.K. Abdrazakova. Pod red. F.K. Abdrazakova. Saratov: FGBOU VO Saratovskiy GAU. 2020. Pp. 13–17. (rus)

Information about the authors

Povarov, Andrey V. PhD, Assistant professor. E-mail: povarov-av2012@yandex.ru. Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov. Russia, 410012, Saratov, pr-kt im. Peter Stolypin, zd. 4, b. 3.

Trushin, Yuri E. PhD, Assistant professor. E-mail: yura.trushin@yandex.ru. Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov. Russia, 410012, Saratov, pr-kt im. Peter Stolypin, zd. 4, b. 3.

Received 21.12.2022

Для цитирования:

Поваров А.В., Трушин Ю.Е. Совершенствование системы теплоизоляции стен многоквартирных домов вторичного жилищного фонда г. Саратова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 46–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-46-54

For citation:

Povarov A.V., Trushin Y.E. Improvement of the thermal insulation system walls of apartment buildings of the secondary housing of the city of Saratov. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 46–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-46-54

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-55-66

^{1,*}Алимова Д.Н., ^{1,2}Перькова М.В.¹Российский университет дружбы народов²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: alimovadariia@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ, РЕГУЛИРУЮЩИХ ПРОЦЕССЫ «ЗЕЛЕННОГО» СТРОИТЕЛЬСТВА

Аннотация. В XX веке в архитектуре и строительной отрасли появилось новое направление «зеленого» строительства. Под «зеленым» или экологическим строительством принято понимать процесс возведения и эксплуатации зданий, обладающих набором особых характеристик. Они отвечают требованиям ресурсосбережения и энергоэффективности, являются экологически чистыми, снижают уровень антропогенного воздействия на окружающую среду, а их концепция соответствует принципам устойчивости. На сегодняшний день многие страны имеют успешный опыт разработки и реализации комплексов мер по контролю и стимулированию экологического «зеленого» строительства. Наиболее широко распространенными экологическими стандартами являются BREEAM, LEED и DGNB. В исследовании рассмотрены наиболее широко распространенные международные стандарты экологической сертификации зданий, а также определены основные группы критериев, которые предъявляют «зеленые» стандарты к процессам возведения и эксплуатации зданий и сооружений. Проведен сравнительный анализ требований ведущих международных стандартов к строительству зданий и выявлены общие черты, преимущества и недостатки международных стандартов зеленого строительства. Сделаны выводы, что системные подходы, реализуемые в стандартах BREEAM, LEED и DGNB позволяют максимально достоверно оценить проект, учитывая его функциональное назначение. Упомянутые системы регулирования экологического строительства имеют выраженную инженерно-техническую направленность. Принципы международных экологических стандартов строительства BREEAM, LEED и DGNB легли в основу национальных систем стандартов, регулирующих «зеленое» строительство во всем мире.

Ключевые слова: экологическое строительство, международные стандарты, сертификация, энергосбережение, ресурсосбережение.

Введение. С 60-х XX века в США, Европе, Австралии и Новой Зеландии получили широкое признание идеи о бережном отношении к природной среде (воздуху, воде, почве, лесным массивам и т.д.) [1]. Постепенно вопросы охраны окружающей среды стали одним из значимых элементов нормативно-правовой системы многих стран мира.

К середине 1980-х годов экологические проблемы были в центре внимания общественности в связи с чередой международных катастроф, нанесших тяжкий вред окружающей среде, таких как катастрофа в Бхопале в 1984 году [2], ядерный взрыв на Чернобыльской АЭС в 1986 году и разлив нефтяного танкера Exxon Valdez в 1989 году [3]. Озабоченность мирового сообщества устойчивостью экологической обстановки резко возросла [4]. По этой причине во многих отраслях, в том числе в области строительства и архитектуры, особое внимание стало уделяться аспектам экологии, в частности, энергоэффективности, ресурсосбережению и снижению негативного воздействия от деятельности человека на окружающую среду.

С ростом беспокойства о росте негативного антропогенного воздействия на окружающую

среду возникла и необходимость минимизировать и предотвратить негативные воздействия. Это стало возможно путем введения особых нормативов в области охраны природы и экологии. На рубеже XX–XXI веков разрабатываются и вводятся первые экологические стандарты, регулирующие процессы строительства зданий и сооружений [5].

Предметом изучения являются категории и критерии международных экологических стандартов, регулирующих процессы «зеленого» строительства.

Целью работы является обзор основных программ сертификации в сфере экологического строительства и сравнение их систем оценки. Задачи исследования:

- изучить основные международные стандарты экологической сертификации зданий;
- определить основные категории и группы критериев в структуре международных стандартов экологического строительства;
- провести сравнительный анализ требований, предъявляемых международными стандартами к процессам строительства и эксплуатации зданий и сооружений;

- выявить общие черты, преимущества и недостатки международных стандартов зеленого строительства.

Методология. В статье применяется совокупность методов эмпирического и теоретического анализа предмета исследования. Основными методами работы являются теоретический анализ источников по «зеленому» строительству, метод обобщения эмпирического материала и применения полученных сведений в отношении нового материала. Используются методы классификации данных и сравнительного анализа данных.

В целях создания общей картины по применению международных стандартов экологического строительства осуществлен анализ источников по смысловым единицам («зеленое/экологическое строительство», «зеленый/экологический стандарт», «BREEAM», «LEED», «DGNB», «энергоэффективность», «ресурсосбережение» и т.д.).

Обзор литературы. Вопросы экологии архитектурного пространства активно затрагиваются в отечественных и зарубежных исследованиях с 1970-х годов. Работы А.П. Вергунова, В.В. Владимирова, Н.М. Демина, А.Г. Большакова, А.Н. Тетиора посвящены изучению охраны окружающей среды в процессах строительства.

Тема экологии проектирования и архитектурно-пространственной организации жилой, производственной и общественной среды отражается в работах В.В. Алексашиной, С.А. Дектерева, А.В. Крашенинникова, А.Д. Куликова и Б.М. Давидсона.

Проблемы обеспечения экологической безопасности при строительстве зданий и сооружений затрагиваются в исследованиях Е.М. Микулиной, В.А. Нефёдова, Н.Г. Благовидовой, Р. Арнхейма, Дж. Гибсона, Э. Эдвардс-Причарда.

Большое внимание роли экологических нормативов в архитектурно-градостроительном проектировании уделяется в трудах В.П. Князевой и С.Б. Чистяковой. К вопросам стандартизации экологического строительства обращаются в своих научных работах А. Гуткин, Г.Д. Крылова, Н.В. Соколова, Е.А. Сухина, А.Ю. Соколовская и Х. Смиф.

Основная часть. В зарубежном архитектурно-градостроительном проектировании период конца XX – начала XXI вв. был отмечен процессом разработки и внедрения устойчивых нормативных требований. Эти изменения, в первую очередь, были призваны повысить уровень экологичности зданий и городских образований [6]. Результатом масштабной работы в

этом направлении стало появление ряда международных систем экологической сертификации строений [7].

Первый добровольный метод экологической оценки зданий был представлен в 1990 году Ведомством по исследованиям в строительстве Великобритании (BRE). Целью разработанного стандарта строительства BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) была объективная оценка экологических характеристик нового или уже существующего здания [8]. Эта методика также способствовала стимулированию девелоперов, инвесторов и строителей к достижению более высоких характеристик экологичности возведения зданий по сравнению с типичными методами строительства.

BREEAM провозглашает следующие глобальные цели: смягчение негативного воздействия зданий на окружающую среду, повышение социального и экономического рейтинга зданий, имеющих экологический сертификат, обеспечение независимой экспертной оценки зданий, стимулирование спроса на сертифицированные здания, популяризация использования в строительстве экологически чистых строительных материалов.

В зависимости от типа сооружения, стандарт BREEAM предлагает несколько схем сертификации:

- 1) BREEAM Communities (для объектов генеральной планировки, включающих большое количество зданий);
- 2) BREEAM New Construction для новых объектов строительства;
- 3) BREEAM In-Use для существующих зданий, которые уже находятся в эксплуатации;
- 4) BREEAM Refurbishment для оценки ремонта внутренней и внешней отделки зданий.

В процессе сертификации сооружению присваиваются баллы в зависимости от степени исполнения заявленных требований. Следует отметить, что каждая схема сертификации BREEAM предполагает наличие требований, обязательных для исполнения.

Согласно методикам BREEAM, после прохождения процедуры многофакторной оценки, сооружению присваивается одна из пяти представленных в рейтинге категорий (рис. 1):

- «Pass» (сертифицирован) при рейтинге 30–40 %;
- «Good» (хорошо) при рейтинге 45–54 %;
- «Very Good» (очень хорошо) при рейтинге 55–69 %;
- «Excellent» (отлично) при рейтинге 70–84 %;
- «Outstanding» (превосходно) при рейтинге выше 85 %.



Рис. 1. Примеры сооружений, сертифицированных по системе BREEAM

Независимая оценка качества зданий международным экспертным сообществом (третьей стороной) обеспечила стандарту BREEAM широкое рыночное применение. Благодаря тому, что система сертификации BREEAM признает одобренные национальные строительные нормативы, в течение последующих лет этот она была успешно адаптирована в других странах. На основе стратегии BREEAM были разработаны стандарты экологического строительства в Канаде, Китае и Новой Зеландии.

В 1998 году в США американским Советом по зеленым зданиям была представлена национальная система стандартизации экологического строительства LEED (The Leadership in Energy and Environmental Design) [9]. Эта методика была предложена в качестве основного «зеленого» строительного стандарта для измерения энергоэффективности и экологичности проектов и зданий. На сегодняшний день соискание сертификата предполагает полное выполнение всех условий стандарта. Несоответствие какому-либо заявленному критерию в системе оценки делает получение знака LEED невозможным.

Обновленная версия LEED, опубликованная в 2009 году состоит из нескольких разделов. В них изложены обязательные требования строительной площадке, транспортной доступности, инфраструктуре, эффективности энерго- и водопотребления, используемым материалам и ресурсам, качеству среды помещений и интеграционным процессам. К числу обязательных к исполнению новых требований LEED, среди прочих, относятся необходимость внедрения инновационных стратегий планирования застройки, а также использование инженерно-технических новаций в процессе строительства.

Для разных типов сооружений и этапов строительства или эксплуатации объектов разработаны несколько схем сертификации:

1) BD+C для этапа проектирования и строительства зданий;

- 2) ID+C для этапа проектирования, строительства и разработки дизайна интерьера;
- 3) O+M для этапа проведения строительных работ и технического обслуживания;
- 4) ND для комплексного развития районов;
- 5) Homes для жилых зданий;
- 6) Cities для районов и городских агломераций.

LEED, как и BREEAM, – рейтинговый стандарт и имеет особую систему начисления баллов для оценки уровня экологичности здания [10]. Уровень сертификата объекта строительства зависит от итогового количества присвоенных баллов (рис. 2). Система оценки предполагает начисление основных баллов за выполнение обязательных требований, без которых сертификация невозможна, и дополнительных баллов. Всего существует четыре типа сертификата LEED:

- «Certified» (базовый) при рейтинге 40–49 баллов;
- «Silver» (серебряный) при рейтинге 50–59 баллов;
- «Gold» (золотой) при рейтинге 60–79 баллов;
- «Platinum» (платиновый) при рейтинге выше 80 баллов.

Основным нормативным документом программы «зеленого» строительства в Германии является разработанный в 2009 году Советом по устойчивому развитию строительства Германии стандарт DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) [11]. Сертификат соответствия DGNB получил широкое распространение в германоязычных странах Европы. Принципы этого стандарта основаны на базовых положениях BREEAM и LEED. В стандарте выделено шесть категорий оценки проекта строительства и самого сооружения:

- экологическое качество здания;
- экономическое обоснование проекта;
- социально-культурные и функциональные качества объекта;

- технологии возведения и эксплуатации;
- качество процессов строительства;

- расположение, инфраструктура и окружающая среда.

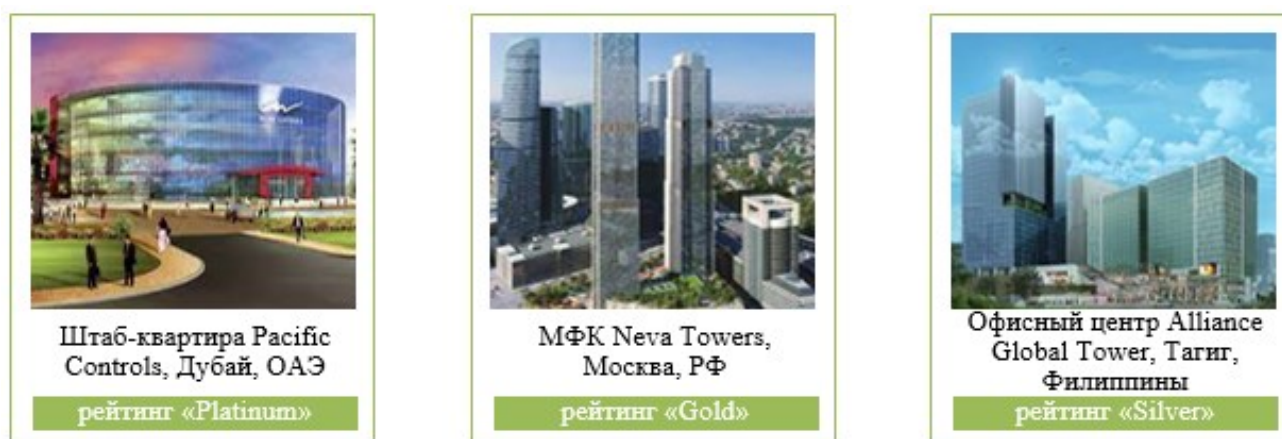


Рис. 2. Примеры сооружений, сертифицированных по системе LEED

Несмотря на то, что система стандартов DGNB является результатом работы большой команды экспертов (архитекторов, строителей, исследователей и консультантов), представители рынка строительства, а именно бизнесмены и технические специалисты, как правило, не приглашаются к участию ни в процессе оценки зданий на соответствие, ни к регулярной работе над усовершенствованием нормативов [12]. Учитывая тот факт, что стандарт предписывает тщательную проработку экономических обоснований проекта, это обстоятельство создает определенный вакуум для качественного взаимодействия всех заинтересованных участников [13].

Особенностью методологии стандарта DGNB является лежащая в его основе концепция интегрального планирования. Такой подход позволяет стимулировать сообщество архитекторов, строителей и инженеров закладывать цели устойчивого развития в концепцию проекта на самой ранней стадии его подготовки. Благодаря этому, большинство проектов-соискателей сертификата изначально проектируются с учетом имеющихся или возможных в ближайшем будущем технологий строительства. Стоит отметить, что качество зданий и сооружений, разработанных по методу DGNB, подтверждается сертификатом соответствия только после ввода объекта в эксплуатацию [14].

По итогам экспертного заключения стандарт DGNB предполагает четыре уровня сертификата:

- «Bronze» (бронзовый) для оценки 35–50 %;
- «Silver» (серебряный) для оценки 50–65 %;
- «Gold» (золотой) для оценки 65–80 %;
- «Platinum» (платиновый) для оценки выше 80 %.

Недавно эксперты DGNB представили новый уровень оценки «Diamond» (бриллиантовый). Она дополнительно учитывает категорию расширенных и меблированных интерьеров. При оценке на соответствие уровню «Diamond» рассматривается не только общая концепция здания, технические, экономические и социальные характеристики. Высокие требования предъявляются к оформлению интерьера, предметам мебели, оснащению бытовой техникой и т. д.

Отдельным сертификатом «Climate Positive» DGNB выделяет образцовые архитектурные проекты, которые имеют углеродно-нейтральный статус. Знак отличия «Climate Positive» присуждается сроком на один год зданиям, которые соответствуют техническим требованиям и предоставляют необходимые доказательства в рамках сертификации эксплуатируемых сооружений (рис. 3).

В отличие от BREEAM и LEED, немецкая система сертификации имеет уникальные требования к этапам строительства и процессу подбора материалов, а также учитывает экономические аспекты и программу эксплуатации здания в течение 50 лет, поэтому DGNB часто называют «стандартом второго поколения» (рис. 4).

К 2022 году по данным аналитических отчетов международных организаций по проведению процедур оценки и выдаче сертификатов, в мире насчитывается более 300 тысяч эксплуатируемых «зеленых» зданий [16]. Оценивая количество проектов, ожидающих и проходящих в настоящее время процедуру соответствия, эксперты говорят о существенном росте сегмента рынка экологического строительства. На долю сертификатов, имеющих на сегодняшний день наиболее

широкое распространение (британский стандарт BREEAM, американский LEED и немецкий DGNB) в мировой практике приходится почти

половина выданных сертификатов – порядка 120 тысяч [17].



Рис. 3. Примеры сооружений, сертифицированных по системе DGNB

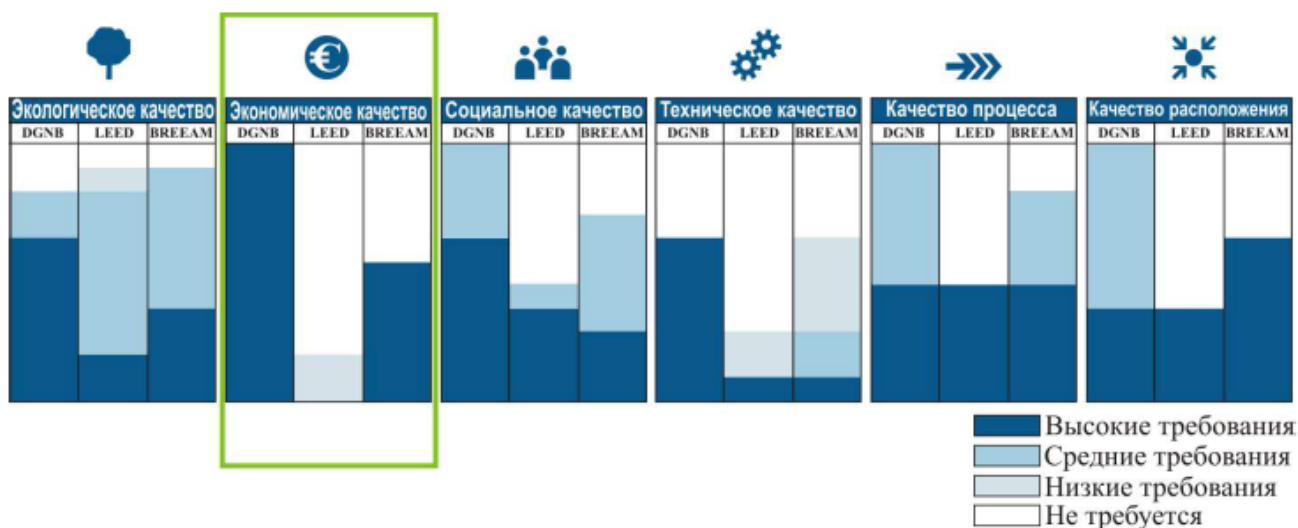


Рис. 4. Сравнительный анализ международных экологических стандартов Питера Мосле [15]

Системы сертификации, имеющие в своей структуре схожие критерии оценки, как правило, отличаются способами проведения процедур соответствия и требованиями к полноте выполнения каждого критерия. Стандарты, разработанные в странах с более жестким национальным законодательством в области строительства, имеют более сложную структуру оценки, а сама процедура соответствия предъявляет повышенные требования к выполнению критериев. Например, Европейское строительное законодательство отличается более градостроительными требованиями и нормами строительства и эксплуатации зданий, чем аналогичные законодательные и нормативные документы, регулирующие отрасль строи-

тельства в США [18]. Поэтому проекты, получившие статус соответствия «Platinum» по оценке LEED, в системе BREEAM могут претендовать только на уровень «Very Good» [19]. Более того, в британской системе сертификат соответствия выдается дважды – на этапе проектирования и по завершении работ. Американский сертификат выдается один раз после введения объекта в эксплуатацию.

Рассматривая международные программы экологической сертификации зданий, которые получили самое широкое применение (BREEAM, LEED, DGNB), можно выделить основные категории оценки и критерии, которые учитываются экспертами при формировании рейтинга (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ систем экологической оценки объектов строительства

Категории/критерии	BREEAM	LEED	DGNB
Организационные вопросы, ввод объекта строительства в эксплуатацию			
<i>Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %</i>	16,38 %	15,36 %	20,40 %
Ввод здания в эксплуатацию и управление объектом	5,12 %		4,56 %
Оценка качества подготовки проекта и комплексное планирование			5,39 %
Уровень шума на стройплощадке	3,54 %		1,09 %
Защита качества воздуха и водных ресурсов в процессе строительства	2,08 %	4,91 %	3,43 %
Безопасность и охрана	1,31 %		2,15 %
Раздельная утилизация бытового мусора и его вывоз	4,33 %	8,29 %	2,69 %
Мероприятия по проведению аудита систем здания		2,16 %	1,09 %
Устойчивое развитие территории, влияние на окружающую среду			
<i>Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %</i>	12,64 %	9,60 %	10,22 %
Сочетание архитектурного стиля здания с окружающей застройкой	3,15 %		3,21 %
Снижение негативного воздействия на окружающую среду	6,67 %	3,91 %	4,14 %
Комплекс мероприятий по поддержке биоразнообразия прилегающей территории	0,87 %	1,15 %	
Реабилитация загрязненной ранее территории	1,95 %		
Расположение площадки застройки		3,09 %	
Учет региональных природных особенностей		1,45 %	2,87 %
Доступность и инфраструктура			
<i>Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %</i>	10,92 %	7,84 %	14,28 %
Доступность общественного транспорта	6,44 %	5,32 %	6,36 %
Близость объектов обслуживания и соцкультбыта	3,12 %		5,87 %
Эффективность пешей доступности объекта строительства			2,05 %
Мероприятия по обеспечению емкости парковки	1,36 %	2,52 %	
Инженерно-технические системы и оборудование			
<i>Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %</i>	20,02 %	34,56 %	14,29 %
Минимизация выбросов парниковых газов	1,03 %	2,89 %	3,09 %
Фильтрация стоков здания для снижения загрязнения природных водотоков	3,31 %	3,77 %	
Контроль и сокращение выбросов CO и CO ₂	3,44 %	3,25 %	3,87 %
Использование приборов учета электроэнергии	2,54 %	4,98 %	
Использование энергоэффективных технологий	5,38 %	8,82 %	5,94 %
Минимизация служебного и личного освещения	0,74 %	1,66 %	
Счетчики расхода воды	2,46 %	2,09 %	
Использование систем рециркуляции воды	1,12 %	3,09 %	1,39 %
Мероприятия по снижению светового загрязнения		1,86 %	
Контроль общего теплового комфорта здания		2,15 %	
Комфорт при эксплуатации объекта			
<i>Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %</i>	7,28 %	0%	12,28 %
Тепловой комфорт жилых площадей	2,02 %		3,21 %
Микроклимат (качество внутреннего воздуха и воды)	4,65 %		4,81 %
Звуковой комфорт			2,94 %
Визуальный комфорт	0,61 %		1,32 %
Эффективное использование материалов			
<i>Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %</i>	10,92 %	19,20 %	6,12 %
Повторное использование материалов	2,09 %	3,04 %	
Использование быстровозобновляемых материалов		4,12 %	
Повторное использование отходов и вторсырья	2,34 %	1,83 %	
Использование экологических строительных материалов	6,49 %	7,89 %	
Использование региональных строительных материалов		2,32 %	
Использование огнестойких материалов			1,86 %
Энерго- и гидроизоляционное качество здания			4,26 %
Конструктивные решения			
<i>Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %</i>	3,64 %	3,84 %	6,11 %
Возможность преобразования/реконструкции			1,98 %
Легкость демонтажа здания			4,13 %
Использование несущих конструкций (при реконструкции)	3,64 %	3,84 %	

Категории/критерии	BREEAM	LEED	DGNB
Объемно-планировочные решения			
Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %	14,56 %	5,76 %	6,13 %
Эффективно используемая площадь			1,97 %
Вентилируемая площадь здания	2,36 %	1,82 %	
Устройство крыши			1,25 %
Мероприятия по использованию (не)возобновляемой энергии	4,88 %	3,94 %	2,91 %
Сбор и использование дождевой воды	0,92 %		
Планировка здания и помещений для эффективного использования	6,04 %		
Эстетические решения			
Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %	1,82 %	1,92 %	4,08 %
Влияние на людей			2,87 %
Использование концепции искусства архитектуры			1,21 %
Индивидуальная концепция жилых помещений		1,28 %	
Обеспечение вида из окон жилых помещений	1,82 %	0,64 %	
Инновации			
Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %	1,82 %	1,92 %	0 %
Использование инновационных решений и технологий	1,82 %	1,92 %	
Экономическое качество			
Кол-во требований рассматриваемого раздела в общей структуре, %	0 %	0 %	6,09 %
Экономические расходы здания, связанные с жизненным циклом			2,64 %
Экономическое значение стабильности проекта застройки			2,94 %
Учет экономической безопасности и рисков			1,51 %

Анализируя систему критериев, которыми руководствуются эксперты, можно сделать вывод, что большинство международных стандартов имеют выраженную инженерно-техническую направленность, а к объемно-планировочным, конструктивным и эстетическим решениям выдвигается относительно небольшое количество требований. Гораздо большее внимание уделяется, например, качеству проектных и инженерно-геодезических изысканий, а также процессов застройки [20]. Например, стандарт DGNB четко регламентирует подготовительные и проектные этапы как основополагающие в эффективной работе по возведению экологического здания. Своевременное внедрение принципов соответствия экологическим стандартам в строительстве является ключевым шагом к их дальнейшей качественной и эффективной реализации [21]. Во всех международных системах оценки большое внимание уделяется энергоэффективным архитектурным решениям. Направленность на сбережение энергии позволяет не только уменьшить в ней действительные потребности здания, но также создать благоприятный для человека микроклимат в помещении и обеспечить повышенный уровень комфорта. Кроме того, строго оцениваются параметры места застройки, ориентации здания по сторонам света, архитектурное формообразование и эстетическое сочетание здания с окружающей застройкой [22]. Каждый стандарт оценивает уровень общественно-деловой и транспортной инфраструктуры прилегающей среды.

Большое количество критериев учитывается в требованиях к строительным ресурсам – качеству и долговечности материалов, их применению, хранению и утилизации. Согласно анализу, приоритет в «зеленых» стандартах отдается материалам с пониженным негативным влиянием на окружающую среду и здоровье человека или с его нулевым значением [23]. Однако, строительные материалы должны обладать всеми необходимыми физическими свойствами для качественного исполнения строительных проектов. Отдельно оценивается использование материалов, которые обладают свойствами снижения теплотеперь здания.

Критерии рационального использования энергетических и водных ресурсов имеют ключевое значение практически во всех системах экологической сертификации зданий. Получение сертификата соответствия предполагает, в первую очередь, оптимальное использование ресурсов. Также учитывается степень применения инновационных технологий по сокращению использования природных ресурсов [24].

В рамках оценки по критериям комфорта и качества внешней и внутренней среды внимание уделяется степени рационального планирования, удобства эксплуатации помещений, а также воздействию пространств здания на физическое, психологическое и эмоциональное здоровье человека [25]. Параметры внешней среды включают в себя аспекты инфраструктуры, уровень эстетической привлекательности объекта строительства, наличие в близкой доступности рекреационных зон и озелененных пространств. В последние годы все больше внимания в структурах

стандартов уделяется наличию условий для комфортной эксплуатации объекта маломобильными группами населения и людьми с ограниченными возможностями здоровья [26]. При оценке внутренней среды учитываются воздушно-тепловые, световые и акустические характеристики всех помещений здания. Стандарты нового поколения предполагают внедрение в процессы строительства и эксплуатации объекта новых технологических и «умных» решений для контроля и управления инженерными системами здания.

По критериям качества санитарной защиты и утилизации отходов проводится оценка применяемых методов снижения количества отходов в процессах строительства и эксплуатации здания, наличие возможности сортировки отходов, качество систем утилизации всех видов отходов на протяжении всего жизненного цикла здания – от проектировки и строительства до эксплуатации и сноса самого сооружения.

На сегодняшний день успешно реализованы и активно применяются 32 национальные системы стандартов в 24 странах мира. В своем большинстве они базируются на принципах «лидеров» – BREEAM, LEED или DGNB [4]. Среди национальных стандартов экологического строительства, получивших широкое применение – австралийская система Green Star, французский сертификат HQE, адаптированные аналоги LEED в Канаде и BREEAM в Нидерландах, локальные сертификаты Green Star в Австралии, Новой Зеландии и ЮАР, системы сертификации CASBEE в Японии, GBI в Малайзии, Tree Star в Китае, Green Mark в Сингапуре [27, 28]. Практически каждый год национальные стандарты совершенствуются, а также появляются новые, которые в большинстве своем учитывают факторы местного климата, тонкости строительного законодательства, культурные, социальные и экономические аспекты.

Например, структура австралийской системы экологической сертификации зданий Green Star была разработана по опыту BREEAM и LEED. Однако, основные базовые принципы стандарта сформулированы с учетом национальных особенностей, в частности, жаркого климата и повышенной влажности [29]. Green Star проводит оценку соответствия по рейтинговой системе. Учитываются параметры и характеристики проекта по 9 категориям, согласно структуре LEED. Австралийский Green Star является стандартом «второго поколения», поэтому, как и DGNB, большое внимание уделяет внедрению принципов устойчивости во всех процессах строительства и эксплуатации зданий, оценивает степень использования инженерно-технологических

инноваций, а также предъявляет требования глубокой степени проработки экономического обоснования проекта.

В Китае до 2007 года широкое применение имела методика оценки по стандарту LEED. Однако, в виду высоких темпов урбанизации, приведших к массовому строительству в городских агломерациях, правительством страны было принято решение о разработке национальной системы. Стандарт получил название Three Star и был сформулирован с учетом большого количества локальных факторов (климат страны, высотность зданий, плотность застройки, национальные и культурные особенности). Структура Three Star состоит из шести стандартных категорий, которые учитывают степень энергоэффективности здания, мероприятия по ресурсосбережению, использование инновационных технологий в процессах строительства здания и управления объектом и т.д. По итогам процедуры соответствия выставляется оценка: достижение каждого из трех уровней (One-, Two- или Three-Star) означает успешное соискательство сертификата, а общий суммарный бал не рассчитывается и не влияет на итоговый результат [30].

Законодательство Японии отличается весьма строгой регламентацией строительных норм. Этот фактор отразился и в структуре национального «зеленого» стандарта CASBEE. По мнению экспертов отрасли, критерии оценки в японском стандарте содержат самые четкие и строгие описания, а требования к их выполнению весьма жесткие по сравнению с другими системами [7, 31]. Как показывает практика экологического строительства в Японии, именно такой подход позволяет достичь максимального снижения негативного антропогенного воздействия в области строительства на окружающую среду в мегаполисе в условиях очень высокой плотности застройки.

В Южной Африке успешно применяется национальная система сертификации SBAT (Sustainable Building Assessment Tool). Стандарт предполагает оценку проекта по трем категориям, который включают в себя в общей сложности 15 параметров. SBAT базируется на параметрах, отраженных в немецком стандарте DGNB, что позволяет качественно оценивать не только процессы возведения здания, но и его последующей эксплуатации в социально-экономической системе страны. В структуру южноафриканского сертификата, помимо стандартных, включены категории экономики, здравоохранения и образования. Особое внимание в стандарте уделяется процессам вовлечения местного сообщества в достижение социальной устойчивости и повышение уровня благополучия населения [32].

Выводы.

1. Международные системы экологической оценки зданий, которые получили самое широкое применение (BREEAM, LEED, DGNB) имеют несколько схем сертификации для разных типов сооружений и этапов строительства. Такой подход позволяет максимально достоверно оценить проект, учитывая его функциональное назначение.

2. Как правило, системы сертификации являются рейтинговыми стандартами и имеют систему начисления баллов для оценки уровня экологичности здания. Уровень сертификата, присвоенный объекту, строительства зависит от итоговой оценки экспертов. Некоторые стандарты устанавливают обязательные требования, без выполнения которых сертификация невозможна, а также предполагают систему особую систему оценки: баллы за соблюдение обязательных и дополнительных требований начисляются раздельно.

3. Большинство международных стандартов имеют инженерно-техническую направленность и предъявляют большое количество обязательных к выполнению требований из категорий энергосбережения, ресурсоэффективности и качеству проектирования.

4. В основу большинства национальных рейтинговых стандартов легли принципы систем сертификации BREEAM, LEED или GGNB, которые были адаптированы с учетом локальных особенностей страны, в которой применяется национальный сертификат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондур В.Г. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 629 с.

2. Мазур И.И. Опасные природные процессы. М.: Экономика, 2004. 702 с.

3. Владимиров В.В., Саваренская Т.Ф., Швидковский Д.О. Градостроительство и экология (биосферные и историко-культурные аспекты): монография. Самара: РАКС, 2000. 124 с.

4. Благовидова Н.Г., Смоляр И.М., Микулина Е.М. Экологические основы архитектурного проектирования. М.: Академия, 2010. 160 с.

5. Jensen L.B., Bjerre L., Mansfeldt L. Sustainability Certification Systems as Guidelines for Early-Phase Urban Design Processes // Journal of Green Building. 2016. No. 11(3). Pp. 81–94.

6. Семин С.А. Идея города в зарубежной архитектуре: обзорная информация. М.: ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре, 1985. 215 с.

7. Соколова Н.В. Экологическое градостроительство зарубежных стран: монография. Пенза: ПГУАС, 2019. 248 с.

8. BREEAM-BRE Environmental Assessment Method. BREEAM Europe Commercial 2009 Assessor Manual, SD 5066A Issue 1.0. BRE Global, 2009. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.breeam.org> (дата обращения: 10.01.2023).

9. LEED-The Leadership in Energy & Environmental Design. LEED 2009 for New Construction and Major Renovations Rating System US Green Building Council 2009. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.usgbc.org> (дата обращения: 10.01.2023).

10. Гуткин А. LEED – рейтинговая система для энергоэффективных и экологически чистых зданий // АВОК. 2008. № 6. С. 32–44.

11. DGNB-Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dgnb.de/en/> (дата обращения: 14.12.2023).

12. Bernardi E., Carlucci S., Cornaro C., Bohne R. A. An Analysis of the Most Adopted Rating Systems for Assessing the Environmental Impact of Buildings // Sustainability. 2017. No. 9. Pp. 1226–1231. DOI:10.3390/su9071226.

13. Tolstykh T., Gamidullaeva L., Shmeleva N., Lapygin Y. Regional Development in Russia: An Ecosystem Approach to Territorial Sustainability Assessment // Sustainability. 2020. No. 12. Pp. 6424–6427. DOI:10.3390/su12166424.

14. Данилина Н.В. Градостроительный анализ. М.: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2020. 27 с.

15. DGNB System. New construction, buildings. Criteria set. Version 2020 international [Электронный ресурс]. URL: <https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/downloads/criteria/DGNB-Criteria-Set-New-Construction-Buildings-Version-2020-International.pdf> (дата обращения: 16.01.2023).

16. Ахмедова Е.А., Ахмедова Л.С. Роль инновационных методов и технологий в современной архитектурной деятельности // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2015. № 18. С. 51–54.

17. Сухина Е. А. Основные положения и сравнение международных экологических стандартов в строительной сфере // Вестник СГТУ. 2013. №1 (73). С. 209–215.

18. Kawakubo S., Murakami S., Ikaga T., Asami Y. Sustainability assessment of cities: SDGs and GHG emissions // Building Research & Information. 2018. No. 46(5). Pp. 528–539. doi: 10.1080/09613218.2017.1356120.

19. Cabrita A.L., Alvarez J.R. BREEAM Communities in Spain. The Sustainable World // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2010. No. 142. Pp. 89–100. doi:10.2495/SW100091.
20. Крашенинников А.В. Макропространства городской среды // АМТ. 2016. № 3(36). С. 1–11.
21. Микулина Е.М., Благовидова Н.Г. Архитектурная экология: учебник для вузов по направлению «Архитектура». М.: Академия, 2013. 249 с.
22. Ивашкина И.В. Экологические аспекты территориального планирования городов // На пути к устойчивому развитию России. 2014. № 69. С. 10–21.
23. Табунщиков Ю.А. Энергоэффективные здания. М.: АВОК-пресс, 2003. 192 с.
24. Володин С.В. Современная градостроительная практика. Комплексная экологическая оценка градостроительных проектных решений. М.: МАРХИ, 2021. С. 45–56.
25. Гарицкая М.Ю., Байтелова А.И., Чекмарева О.В. Экологические особенности городской среды. Оренбург: ОГУ, 2012. 216 с.
26. Перькова М.В. Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов (на примере Белгородской области): дис. док. арх. Санкт-Петербург, 2018. С. 253–257.
27. Yoon J., Park J. Comparative Analysis of Material Criteria in Neighborhood Sustainability Assessment Tools and Urban Design Guidelines: Cases of the UK, the US, Japan, and Korea // Sustainability. 2015. No. 7. Pp. 14450–14487. DOI:10.3390/su71114450.
28. Mostafave M., Doherty G. Ecological urbanism. Horward University Graduate School for Design. Karlsruhe: Lars Müller Publishers; 2010. 16 p.
29. Чистякова С.Б. Использование градоэкологических подходов к благоустройству и озеленению городов // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: Сборник научных трудов РААСН: в двух томах. М.: АСВ, 2021. С. 416–422.
30. Borges L.A., Hammami F., Wangel J. Reviewing Neighborhood Sustainability Assessment Tools through Critical Heritage Studies // Sustainability. 2020. No. 12. Pp. 1605–1611. DOI:10.3390/su12041605.
31. Adewumi A., Onyango V., Moyo D., Al Waer, H. A review of selected neighbourhood sustainability assessment frameworks using the Bellagio STAMP // International Journal of Building Pathology and Adaptation. 2019. No. 37(1). Pp. 108–118. DOI:10.1108/IJBPA-07-2018-0055.
32. Castellani V., Sala S. Sustainability Indicators Integrating Consumption Patterns in Strategic Environmental Assessment for Urban Planning // Sustainability. 2013. No. 5. Pp. 3426–3446. DOI:10.3390/su5083426.

Информация об авторах

Алимова Дария Николаевна, аспирант департамента архитектуры РУДН. E-mail: alimovadaria@yandex.ru. Российский университет дружбы народов. Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, доцент, директор Высшей школы дизайна и архитектуры Политеха Петра Великого, профессор департамента архитектуры РУДН. 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, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Поступила 14.02.2022 г.

© Алимова Д.Н., Перькова М.В., 2023

^{1,*}Alimova D.N., ^{1,2}Perkova M.V.

¹Peoples' Friendship University of Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

*E-mail: alimovadaria@yandex.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARDS FOR GREEN BUILDING

Abstract. In the 20th century, a new direction of green construction appeared in architecture and construction industry. Green building implies the process of constructing and operating buildings that are environmentally friendly and sustainable, energy efficient, technologically advanced and comfortable for human habitation. Nowadays, many countries have a successful experience in developing and implementing systems

to control and encourage green building. The most widespread ecological standards are BREEAM, LEED and DGNB. These main international standards for green certification of buildings are reviewed in the research. The main groups of criteria described in the green standards are identified. A comparative analysis of the requirements to the construction processes of international green standards is performed. Common features, advantages and disadvantages of international green building standards are revealed. The systemic approaches implemented in BREEAM, LEED and DGNB allow a building project to be assessed as reliably as possible and take into account its functional purpose. Green building standards have a strong engineering focus. BREEAM, LEED and DGNB principles have become the basis for local green building standards around the world.

Keywords: green building, green standards, certification, energy efficiency, resource saving, environmental construction

REFERENCES

1. Bondur V.G. Monitoring and forecasting of natural catastrophes [Monitoring i prognozirovanie prirodnyh katastrof]. Moscow: Scientific world, 2009. 629 p. (rus)
2. Mazur I.I. Dangerous natural processes [Opasnye prirodnye processy]. Moscow: Economics, 2004. 702 p. (rus)
3. Vladimirov V.V., Savarenskaja T.F., Shvidkovskij D.O. Urban planning and ecology (biosphere, historical and cultural aspects): monograph [Gradostroitel'stvo i jekologija (biosfernye i istoriko-kul'turnye aspekty)]. Samara: RAKS, 2000. 124 p. (rus)
4. Blagovidova N.G., Smoljar I.M., Mikulina E.M. Ecological foundations of architectural design [Jekologicheskie osnovy arhitekturnogo proektirovaniya]. Moscow: Akademija, 2010. 160 p. (rus)
5. Jensen L.B., Bjerre L., Mansfeldt L. Sustainability Certification Systems as Guidelines for Early-Phase Urban Design Processes. Journal of Green Building. 2016. No. 11(3). Pp. 81–94.
6. Semin S.A. The idea of a city in foreign architecture: overview information [Ideya goroda v zarubezhnoj arhitekture: obzornaya informaciya]. Moscow, TsSTI on civil engineering and architecture, 1985. 215 p.
7. Sokolova N.V. Green building of foreign countries: a monograph [Ekologicheskoe gradostroitel'stvo zarubezhnyh stran: monografiya]. Penza: PGUAS, 2019. 247p. (rus)
8. BREEAM-BRE Environmental Assessment Method. BREEAM Europe Commercial 2009 Assessor Manual, SD 5066A Issue 1.0. BRE Global, 2009. URL: <http://www.breeam.org> (date of treatment: 10.01.2023).
9. LEED-The Leadership in Energy & Environmental Design. LEED 2009 for New Construction and Major Renovations Rating System US Green Building Council 2009. URL: <http://www.usgbc.org> (date of treatment: 10.01.2023).
10. Gutkin A. Rating system for energy efficient and environmentally friendly buildings [LEED – rejtingovaja sistema dlja jenergojeffektivnyh i jekologicheskij chistyh zdaniy] AVOK. 2008. No.6. Pp. 32–44. (rus)
11. DGNB-Deutsche Gesellschaft fur Nachhaltiges Bauen eV. URL: <http://www.dgnb.de/en/> (date of treatment: 14.12.2023).
12. Bernardi E., Carlucci S., Cornaro C., Bohne R. A. An Analysis of the Most Adopted Rating Systems for Assessing the Environmental Impact of Buildings. Sustainability. 2017. No. 9. Pp. 1226–1231. doi:10.3390/su9071226.
13. Tolstykh T., Gamidullaeva L., Shmeleva N., Lapygin Y. Regional Development in Russia: An Ecosystem Approach to Territorial Sustainability Assessment. Sustainability. 2020. No. 12. Pp. 6424–6427. DOI:10.3390/su12166424.
14. Danilina N.V. Urban planning analysis [Gradostroitel'nyj analiz]. Moscow, Publishing house MISS – MGSU, 2020. 27 p. (rus)
15. DGNB System. New construction, buildings. Criteria set. Version 2020 international. URL: <https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/downloads/criteria/DGNB-Criteria-Set-New-Construction-Buildings-Version-2020-International.pdf> (date of treatment: 16.01.2023).
16. Akhmedova E.A., Akhmedova L.S. The role of innovative methods and technologies in modern architectural activity [Rol' innovacionnyh metodov i tekhnologij v sovremennoj arhitekturnoj deyatel'nosti]. Bulletin of the Volga regional branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Science, 2015. No. 18. Pp. 51–54. (rus)
17. Sukhinina E.A. The main principles and comparison of international green standards in the building sector [Osnovnye polozheniya i sravnenie mezhdunarodnyh ekologicheskikh standartov v stroitel'noj sfere]. Vestnik SGTU. 2013. No. 1(73). Pp. 209–215. (rus)
18. Kawakubo S., Murakami S., Ikaga T., Asami Y. Sustainability assessment of cities: SDGs and GHG emissions. Building Research & Information. 2018. No. 46(5). Pp. 528–539. doi:10.1080/09613218.2017.1356120.
19. Cabrita AL., Alvarez JR. BREEAM Communities in Spain. The Sustainable World. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2010. No. 142. Pp. 89–100. doi:10.2495/SW100091.

20. Krashennnikov AV. Macro-space city environment [Makroprostranstva gorodskoj sredy]. AMIT, 2016. No. 3(36). Pp. 1–11. (rus)
21. Mikulina E.M., Blagovidova N.G. Architectural ecology: a textbook for universities with a specialization in "Architecture" [Arhitekturnaja jekologija: uchebnik dlja vuzov po napravleniju «Arhitektura»]. Moscow: Akademiya, 2013. 249 p. (rus)
22. Ivashkina I.V. Environmental aspects of urban territorial planning. Towards sustainable development of Russia [Na puti k ustojchivomu razvitiyu Rossii]. 2014. No. 69. Pp. 10–21. (rus)
23. Tabunshchikov Yu.A. Brodach M.M., Shilkin N.V. Energy efficient buildings [Energoeffektivnye zdaniya]. Moscow, AVOK-press Publ. 2003. 192 p. (rus)
24. Volodin S.V. Modern urban planning practice. Comprehensive environmental assessment of urban planning design solutions (Presentation) [Sovremennaya gradostroitel'naya praktika. Kompleksnaya ekologicheskaya ocenka gradostroitel'nyh proektnykh reshenij. Prezentaciya]. Moscow, 2021. Pp. 45–56. (rus)
25. Garitskaya M.Yu., Baitelova A.I., Chekmarova O.V. Ecological features of the urban environment [Ekologicheskie osobennosti gorodskoj sredy]. Orenburg, OGU, 2012. 216 p. (rus)
26. Perkova M.V. Urban development of the regional settlement system and its elements (on the example of the Belgorod region) [Gradostroitel'noe razvitie regional'noj sistemy rasseleniya i ee elementov (na primere Belgorodskoj oblasti, Dokt. Diss.]. St. Petersburg, 2018. Pp. 253–257. (rus)
27. Yoon J., Park J. Comparative Analysis of Material Criteria in Neighborhood Sustainability Assessment Tools and Urban Design Guidelines: Cases of the UK, the US, Japan, and Korea. Sustainability, 2015. No. 7. Pp. 14450–14487. doi:10.3390/su71114450.
28. Mostafave M., Doherty G. Ecological urbanism. Horward University Graduate School for Design. Karlsruhe, Lars Müller Publishers, 2010. 16 p.
29. Chistyakova S.B. Belyaeva E.L. The use of urbanecological approaches to the improvement and greening of cities [Ispol'zovanie gradostokologicheskikh podkhodov k blagoustroystvu i ozeleneniyu gorodov]. In: Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020: Collection of scientific papers of the RAASN, in two volumes [Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrasli Rossiiskoi Federatsii v 2020 godu : Sbornik nauchnykh trudov RAASN : v dvukh tomakh]. Moscow, ASV Publ., 2021. Pp. 416–422. (rus)
30. Borges L.A., Hammami F., Wangel J. Reviewing Neighborhood Sustainability Assessment Tools through Critical Heritage Studies. Sustainability, 2020. No. 12. Pp. 1605–1611. doi:10.3390/su12041605.
31. Adewumi A., Onyango V., Moyo D., Al Waer, H. A review of selected neighbourhood sustainability assessment frameworks using the Belagio STAMP. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 2019. No. 37(1). Pp. 108–118. doi:10.1108/IJBPA-07-2018-0055.
32. Castellani V., Sala S. Sustainability Indicators Integrating Consumption Patterns in Strategic Environmental Assessment for Urban Planning. Sustainability, 2013. No. 5. Pp. 3426–3446. doi:10.3390/su5083426.

Information about the authors

Alimova, Daria N. Postgraduate student. E-mail: alimovadaria@yandex.ru. Peoples' Friendship University of Russia. Russia, 117198, Moscow, st. Miklukho-Maklaya, 6.

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

Received 14.02.2023

Для цитирования:

Алимова Д.Н., Перькова М.В. Сравнительный анализ международных экологических стандартов, регулирующих процессы «зеленого» строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 55–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-55-66

For citation:

Alimova D.N., Perkova M.V. Comparative analysis of international standards for green building. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 55–66. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-55-66

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-67-76

**Ивина М.С., Рахимова П.С.*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

**E-mail: m.s.ivina@mail.ru*

ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА В СТРУКТУРЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОЛОДЕЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ опыта проектирования отечественных и зарубежных общественных пространств в структуре многофункциональных молодежных комплексов. Актуальность темы обоснована тем, что современные общественные пространства – это многофункциональные объекты, в которых возможна реализация досуговой, культурно-просветительской и другой деятельности молодежи. Определены типы общественных пространств в молодежных комплексах: спортивные площадки, амфитеатр, атриум, фаблаб, эко-пространство, актовый зал, многофункциональный зал Blackbox. Изучены функциональный состав и планировочная структура общественных пространств, а также способы организации различных мероприятий. Определены способы взаимодействия общественных пространств со структурой молодежного комплекса. Элементы благоустройства интегрированы в структуру комплекса. Общественные пространства могут являться главной функцией комплекса (фаблаб, зал Blackbox), рекреационно-коммуникационной (атриум) или второстепенной (амфитеатр, эко-пространство). Особый интерес представляют эко-пространства, представленные в виде городских ферм, «зеленых» лабораторий. Определена специфика зарубежных общественных пространств, которая заключается в интерактивности, многофункциональности, универсальности, новаторских решениях, применении «зеленых технологий», современных материалов и конструктивных решений. Выявлены проблемы в архитектурно-планировочных решениях отечественных общественных пространств: типовые решения, монофункциональность. Развитие архитектурно-планировочных решений общественных пространств в структуре многофункциональных молодежных комплексов в соответствии с интересами молодежи позволит развивать различные сценарии: обучение, самообразование, общение, развлечение.

Ключевые слова: общественные пространства, молодежные комплексы, многофункциональность, архитектурно-планировочные решения, деятельность, зарубежный и отечественный опыт.

Введение. В настоящее время в целях реализации «Стратегии развития молодежи Российской Федерации на период до 2025 года» большое внимание уделяется развитию творческого потенциала, духовно-нравственной культуры, возможностей реализации в культуре, а также проблеме организации досуга молодежи [1].

В связи с этим, как тип здания, получает развитие молодежный многофункциональный комплекс (далее ММК). Именно в этом типе общественного здания возможно культурное, творческое развитие и становление потенциальных личностных способностей молодежи. В ММК собраны модные и востребованные форматы интеллектуального и творческого досуга, которые помогают молодым людям совершенствовать навыки и знания [2].

Особый интерес в структуре ММК представляют общественные пространства (далее ОП), в которых возможна организация досуговой, культурно-просветительской и другой деятельности молодежи.

Стоит отметить, что к ОП относятся как открытые городские пространства (площади, бульвары и т.д.), так и части зданий (атриумы, галереи и другие) [3], которые играют важную роль в

формировании окружающей среды и активизации городской жизни [4].

Специфика архитектурно-планировочных решений таких ОП заключается в возможности проведения мероприятий, которые соответствуют интересам молодежи (спорт, творчество, проблемы экологии, воркшоп, прикладное творчество).

Основными тенденциями развития современных ОП являются: многофункциональность, трансформативность, интерактивность, экологичность, качество, комфорт, безопасность, легкодоступность [5, 6].

Среди главных критериев оценки ОП можно отметить: сбалансированность и иерархичность системы, взаимосвязь и взаимодействие ОП со зданиями [7].

ОП являются местом проявления идентичности, культуры и традиций местного населения [8].

Методы, оборудование, материалы. Научной базой исследования послужили труды А.Н. Гельфонд, А.Ф. Еремеевой, Л.П. Лаврова, Е.С. Палей, раскрывающие проблемы проектирования современных многофункциональных обще-

ственных комплексов, а также вопросы организации архитектурной среды общественных пространств.

Цель исследования состоит в изучении типов, функционального состава и планировочной структуры общественных пространств в молодежных центрах, а также способов организации различных мероприятий.

Задачей исследования является проведение сравнительного анализа зарубежного и отечественного опыта проектирования и строительства ОП в ММК. Из мировой практики были выбраны объекты, в полной мере раскрывающие тенденции развития ОП в ММК.

Объектом изучения являются общественные пространства в структуре молодежных комплексов.

Основная часть. Все общественные пространства в структуре многофункциональных молодежных комплексов можно разделить на открытые и закрытые [9].

Открытые ОП создаются на территории, прилегающей к комплексу. Примером таких пространств могут служить спортивные площадки, эксплуатируемая кровля, амфитеатр.

Для зарубежного опыта характерно наличие благоустроенной полифункционально используемой территории, которая включает площадки различного назначения в зависимости от направленности ММК [10].

Спортивная зона, как правило, состоит из специализированных площадок и спортивных полей для организации игр, что позволяет проводить следующие мероприятия: скейтбординг, катание на роликовых коньках, BMX-райдинг, дерт-джампинг и т.д.

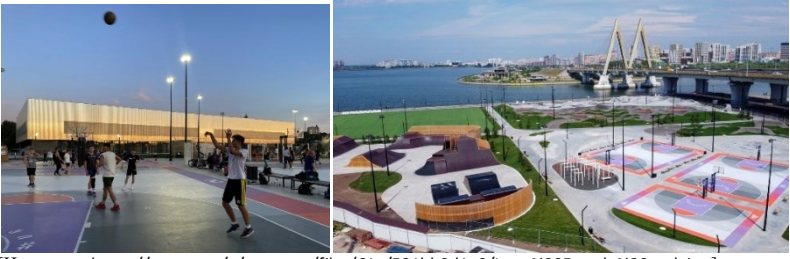
Так, например, на территории, прилегающей к общественному и образовательному центру «Hjerttet» (Дания), доминирующей функцией которого является спорт, развита спортивная зона. Открытое общественное пространство включает в себя чашу для скейтбордистов, роллер-парк, велосипедный памп-трек, беговые склоны, зону для паркура, игровые площадки, пляжные волейбольные ямы и многофункциональное игровое поле; а также более тихие зоны: площадки для петанка, йоги и пикников (табл. 1).

Для отечественного опыта данное направление так же является приоритетным, однако построенные и действующие подобные объекты не многочисленны.

В качестве примера стоит отметить молодежный многофункциональный экстрим-парк УРАМ (Казань), который объединяет под одной крышей спортивные и образовательные, социальные и культурные функции (табл. 1), [11]. Доминирующей является спортивная зона, включающая обычные спортивные площадки, экстрим-парк, чашу для скейтбордистов, BMX-райд, площадку паркура, два памп-трека и стритбольную зону.

Таблица 1

Спортивная зона в структуре ММК

Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство		Мероприятия
Общественный и образовательный центр Hjerttet (арх. бюро C. F. Møller, 2018г., Дания, Икаст-Бранне)	 [Источник: https://i.archi.ru/i/650/283160.jpg] [Источник: https://i.archi.ru/i/650/283161.jpg]		-скейтбординг; -катание на роликовых коньках; -дерт-джампинг; -паркур; -йога -спортивные командные игры; -пикники;
Крытый молодежный многофункциональный экстрим-парк УРАМ (арх. бюро Legato Sports Architecture, 2021г., Казань)	 [Источник: https://prorus.ru/_manager/files/61a/521bb0d1e0/Long%20Facade%20park.jpg] [Источник: https://cdn5.vedomosti.ru/crop/image/2022/1a/nwtdx/original-uz3.jpg?height=934&width=1660]		-скейтбординг; -катание на роликовых коньках; -дерт-джампинг; -паркур; -командные игры на поле; -BMX-райдинг; -стритбол;

Важной тенденцией является использование приемов «экологической архитектуры» (эксплуатируемые кровли, зимние сады) (табл. 2).

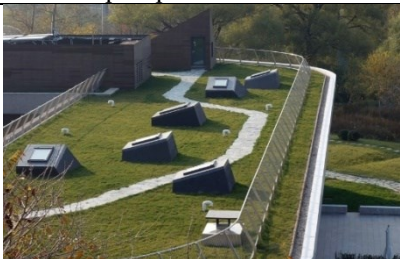
На «зеленой» кровле возможно устройство различных функциональных зон: прогулочной, отдыха, деловой, культурно-просветительской, бытовой.

Эксплуатируемая кровля молодежно-культурного центра Гехуа (Китай) благоустроена площадками, покрыта зеленью, что позволяет проводить множество мероприятий на свежем воздухе.

В отечественном опыте данное направление только получает развитие. В качестве примера можно привести молодежный культурный центр ЗИЛ, в зимнем саду которого проходят тематические вечера и мастер классы.

Таблица 2

Эксплуатируемая кровля и зимние сады в структуре ММК

Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство	Мероприятия
Молодежно-культурный центр Гехуа (арх. бюро Open Architecture, 2012 г., Китай, Циньхуандао)	  [Источник: https://images.adsttc.com/media/images/5063/c0ff/28ba/0d08/0700/0218/large_jpg/stringio.jpg?1414540876] [Источник: https://www.floornature.com/media/photos/30/9284/20_open-architecture-geuha-youth-and-cultural-center_full.jpg]	-прогулки; -пассивный отдых; -пикники; -медитация; -лекции; -музыкальные вечера; -мастер-классы
Молодежный культурный центр ЗИЛ (арх. братья Веснины 1937, реконструкция, 2012, Москва)	  [Источник: https://cdn.kassir.ru/msk/venue/b1/b1e9b036a74260bc346f7ff9ef95f6ef.jpg] [Источник: https://cdn.culture.ru/images/4e31b8eb-7866-5363-ab27-e6135b9c2fa2/h_400,c_fill,g_center/758bbe24c8b176fc1eedc17d0cc6901.jpg]	- тематические вечера; - мастер классы; - медитация

Распространенным видом открытого общественного пространства является амфитеатр (табл. 3).

Амфитеатр включает сцену, зрительские места, зону для установки оборудования. Как правило, сцена и сидения имеют следующие габариты: высота каждой ступени 40–45 см, ширина

до 80 см, диаметр арены от 8 м и более. Планировочное решение амфитеатра должно быть универсальным для проведения образовательных, культурно-развлекательных мероприятий и обеспечивать хорошую акустику и видимость сцены [12].

Таблица 3

Амфитеатр в структуре ММК

Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство	Мероприятия
Многофункциональный медиа-центр (арх. бюро Henning Larsen Architects, 2017г., Германия, Штутгарт)	  [Источник: https://aasarchitecture.com/wp-content/uploads/Stuttgart-s-new-Citizen-and-Media-Center-by-Henning-Larsen-Architects-00.jpg] [Источник: https://images.adsttc.com/media/images/520d/35e9/e8e4/4e20/3000/008c/large_jpg/Political_view_1_phase_competition.jpg?1376597460]	-лекции; -концерты; -мастер-классы; -тематические вечера; -театральные постановки;
Многофункциональный центр «Арт-квадрат» (арх.бюро «Мастерская Д. Винкельмана» 2020г., Уфа)	  [Источник: https://i.archi.ru/i/369434.jpg] [Источник: https://i.archi.ru/i/369438.jpg]	-концерты; -фестивали; -мастер-классы; -театральные постановки; - музыкальные и поэтические вечера; -лекции

Так, амфитеатр вместимостью 120 человек многофункционального медиа-центра (Германия), является универсальным пространством и может быть использован для лекций, концертов, мастер-классов, тематических вечеров, театральных постановок.

На площади перед молодежным центром «Арт-квадрат» (Уфа) расположен деревянный многоуровневый амфитеатр вместимостью 400 человек. Амфитеатр приспособлен под проведения различных событий и мероприятий развлекательного, образовательного, творческого и социального характера самых разных форматов: театральные постановки, поэтические и музыкальные вечера, концерты, лекции.

В качестве закрытых ОП в ММК можно рассмотреть атриум, многофункциональный зал Blackbox, актовый зал, фаблаб.

Использование атриумной объемно-планировочной схемы при проектировании ММК является распространенным приемом в зарубежном опыте.

Атриум является важным коммуникационным элементом, который связывает здание в целом и с окружающей средой, а также является универсальным пространством, в состав которого могут входить следующие зоны: отдыха, фуд-корта, коворкинга и т.д. В атриуме возможно проведение различных социокультурных мероприятий (мастер-классы, тематические вечера, лекции, выставки) [13, 14].

Например, в атриуме культурного центра Utopia (Бельгия) размещена библиотека, оборудованная цифровыми девайсами, что делает ее современным пространством (табл. 4).

Таблица 4

Атриум в структуре ММК (зарубежный опыт)

Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство	Мероприятия
Культурный центр Utopia (арх. бюро KAAN Architecten, 2018г., Бельгия, Алст)	  [Источник: https://static.dezeen.com/uploads/2018/07/kaan-architecten-utopia-library-architecture_dezeen_2364_col_24-852x353.jpg] https://images.adsttc.com/media/images/5b34/1d9e/f197/cc63/4100/0046/slideshow/12_Utopia_KAAN_Architecten_%C2%A9Delfino_Sisto_Legnani_e_Marco_Cappelletti.jpg?1530142106]	-читальный зал; -встречи; -отдых; -обучение; -мастер-классы; -тематические вечера; -лекции; -соборания; -презентации

Другим интересным современным пространством является зал Black box – это многофункциональное, трансформируемое пространство вместимостью 150–200 человек, в состав которого включены: зона зрительских мест, трансформируемая зона, кино-зона, зона для установки музыкальных инструментов, технические помещения. Стены, пол и потолок такого зала окрашены в матовый черный цвет [15].

Так, в культурном центре МЕСА (Франция) на первом этаже, в зоне, прилегающей к амфитеатру и ресторану, расположен многофункциональный зал Black box на 250 мест, оборудованный профессиональной современной техникой (мобильный экран, освещение и т.д.). Зал является новой и нестандартной площадкой для проведения мероприятий разной направленности (табл. 5).

Однако для отечественного опыта подобные решения не многочисленны. Нетипичным решением для национальной библиотеки Республики Татарстан (Казань) стал многофункциональный зал Black box. Трансформируемый зал вмещает

130 человек, подходит для концертов, кинопоказов, хореографических и камерных постановок, видеоинсталляций, мастер-классов, экспериментальных спектаклей, творческих встреч и тематических проектов (табл. 5).

Современный актовый зал является трансформируемым пространством, в котором возможно проведение различных мероприятий.

Характерным примером может служить молодежно-культурный центр Гехуа (Китай), включающий помимо различных помещений, трансформируемый актовый зал вместимостью на 120 человек. Одна из стен зала оборудована двумя прозрачными складывающимися дверьми, при открытии которых внутренний двор, расположенный за сценой, становится частью актового зала. Помимо этого, двор может играть роль кинотеатра под открытым небом [16] (табл. 6).

В доме культуры ГЭС-2 (Москва) актовый зал вместимостью 420 человек работает как трансформер: под полом установлен лифт, который при необходимости поднимает на сцену роуль и декорации, сама сцена при этом опускается

и поднимается, акустические панели регулируются, первые восемь зрительных рядов могут опускаться под пол. Стена за сценой прозрачная, так что при необходимости во время постановок

можно задействовать и уличное пространство в качестве декорации или наоборот закрыть его на время кинопоказов (табл. 6).

Таблица 5

Многофункциональный зал Blackbox в структуре ММК

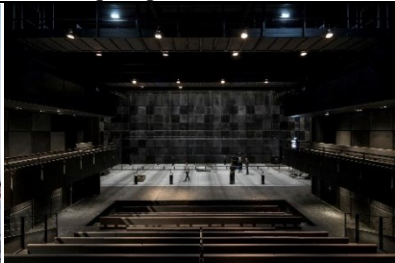
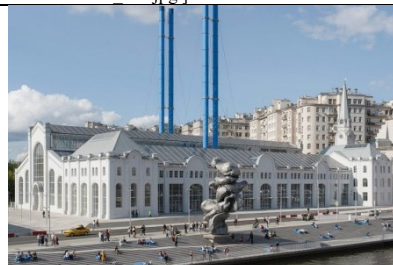
Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство		Мероприятия
Культурный центр МЕСА (арх. бюро BIG, 2019г., Франция, Бордо)			-репетиции -перформансы -видеопоказы -конференции -концерты -корпоративные мероприятия -презентации
Национальная многофункциональная библиотека Республики Татарстан (арх. бюро ХОРА, 2020г., Россия, Казань)			-мастер-классы -тимбилдинги -тренинги -семинары -презентации -переговоры -конференции -языковые курсы -образовательные занятия

Таблица 6

Актный зал в структуре ММК

Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство		Мероприятия
Молодежно-культурный центр Гехуа (арх. бюро Open Architecture, 2012г., Китай, Циньхуандао)			-спектакли -кинопоказы; -перформансы; -концерты; -музыкальные представления;
Дом культуры ГЭС-2 (арх. бюро Renzo Piano Building Workshop, окончание реконструкции 2021г., Россия, Москва)			-кинопоказы; -лекции; -перформансы; -концерты; -музыкальные представления; -театральные постановки

В современной архитектуре отчетливо проявляется тенденция развития такого ОП как фаблаб. Фаблаб (от английского Fab Lab=Fabrication Laboratory), открытая лаборатория цифрового производства [17]. Такие лаборатории позволяют молодым людям обучиться и реализовать свои научно-технические, творче-

ские и инновационные идеи, используя современное оборудование с числовым программным управлением (3D-принтеры, лазерные и фрезерные станки и др.) [18, 19].

Лаборатории фаблаб имеют площадь 50–100 м², планировочно могут быть организованы как единое пространство или обособленными помещениями. В состав фаблаба входят

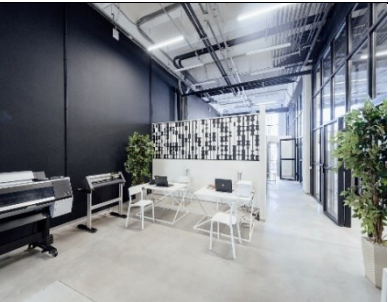
различные мастерские, зоны с оборудованием, для работы с робототехникой, для проведения экспериментов, переговорные.

Например, в мультифункциональном центре Nieuwe Veste (Нидерланды), фаблаб площадью 76 м², расположенный на 1 этаже здания, разделен на обособленные помещения (DIY-мастерская, отделение с оборудованием, 3D-комната, переговорная, место для работы с робототехникой), которые имеют связь с единым общим пространством. Под руководством тренеров-производителей можно изучить такие техники, как 3D-печать, лазерная резка, 3D-дизайн, программирование, изготовление наклеек и многое другое (табл. 7).

Творческий многофункциональный молодежный кластер «Октава» (Тула) включает инновационную лабораторию «ФабЛаб», площадью 58 м². Лаборатория «ФабЛаб» расположена на 1 этаже, имеет отдельный вход и состоит из двух смежных помещений: общей мастерской и образовательной зоны. Общая мастерская включает в себя следующие зоны: 3D-печати и 3D-дизайна, лазерной резки, изготовления наклеек, зона работы с электроникой. Образовательная зона является местом для проведения мастер-классов, воркшопов (табл. 7).

Таблица 7

Фаблаб в структуре ММК

Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство	Мероприятия
Мультифункциональный культурный центр Nieuwe Veste (арх. бюро АНН, 2019, Нидерланды, Бреда)	  [Источник: https://www.emcobau.com/pim/_processed_/2/2/csm_emco_bau_De_Nieuwe_Veste_7_20170427134546_215900_5b78e4e38e.jpg] [Источник: https://coevordernieuws.nl/wp-content/uploads/2022/11/school4.jpg]	-лазерная резка; -3D-печать; -программирование; -образовательные мероприятия; -цифровое производство; -робототехника; -проектная деятельность; -мастер-классы
Творческий многофункциональный молодежный кластер «Октава» (арх. бюро Orchestra Design, 2018г., Россия, Тула)	  [Источник: https://i.archi.ru/i/650/286953.jpg] [Источник: https://redeveloper.ru/upload/resize_cache/iblock/4bb/1200_1000_1/DSC_7660.jpg]	-3D-печать; -лазерная резка; -3D-дизайн; -программирование; -работа с электротехникой; -образовательные мероприятия; -проектная деятельность; -воркшопы

Особый интерес в качестве общественных пространств, представляют эко-пространства, развитие которых возможно, как внутри здания, так и за его пределами. Экопространства могут быть представлены в виде городских ферм, «зеленых» лабораторий. Идея городских ферм соответствует целям устойчивого развития, которые направлены на решение существующих экологических проблем. Такой вид общественного пространства решает проблему озеленения, а также предоставляет возможность для приложения труда (выращивание сельскохозяйственных культур) и досуга [20–21].

Однако этот прием не является распространенным как для зарубежного, так и для отечественного опыта и примеры подобных решений не многочисленны.

В качестве зарубежного примера можно отметить кампус университета Thammasat University Rooftop Farm (Таиланд). На эксплуатируемой кровле кампуса размещено полифункциональное эко-пространство, которое включает органическую ферму, где выращивают более 40 сельскохозяйственных культур, большой амфитеатр, используемый для образовательных семинаров по устойчивым методам ведения сельского хозяйства (табл. 8).

Многофункциональный центр «ДОМ» (Казань), посвященный эко-тематике, включает в себя лабораторию, трансформируемые залы, интерактивные пространства и зоны отдыха. На кровле центра оборудована небольшая смотровая площадка для проведения мероприятий на свежем воздухе (табл. 8).

Таблица 8

Экопространство в структуре ММК

Название объекта.	Общий вид. Общественное пространство	Мероприятия
Thammasat University Rooftop Farm (арх.бюро Landprocess, 2021 г., Таиланд, Бангкок)	 [Источник: https://worldlandscapearchitect.com/wp-content/uploads/2020/01/Thammasat-University-urban-rooftop-farm-LANDPROCESS-1-678x381.jpg] [Источник: https://www.greenroofs.com/wp-content/uploads/2021/02/TURF-LANDPROCESS-58756-main_5298-1_58756_sc_v2com.jpg]	-образовательные семинары; -фермерство; -земледелие; -прогулки; -мастер-классы; -лекции
Экологический многофункциональный центр «ДОМ»(арх. бюро Архитектурный десант, 2017г., Казань)	 [Источник: https://prorus.ru/_manager/files/5d2/76ff916f27/sdi-4632-26036194368-o.jpg] [Источник: https://prorus.ru/_manager/files/5d2/76ff917410/sdi-4533-39198651484-o.jpg]	-лекции; -практические занятия; -мероприятия на свежем воздухе -творческие занятия; -мультимедийные занятия;

Выводы.

1. Сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта позволил определить специфику архитектурной организации ОП в ММК. В зарубежных ММК в значительной мере уделяется внимание проектированию ОП, прослеживается комплексная система развития, включающая различные типы: спортивные площадки, амфитеатр, атриум, фаблаб, эко-пространство, актовый зал, многофункциональный зал Blackbox. Это позволяет реализовывать следующие виды деятельности: учебно-образовательную, культурно-просветительскую, спортивную, эконоправленную.

2. Характерной чертой зарубежных ОП является интерактивность, многофункциональность, универсальность, возможность трансформации в зависимости от осуществляемой деятельности. Образная составляющая ОП формируется с использованием новаторских решений, «зеленых технологий», современных материалов и конструктивных решений.

3. В России система общественных пространств в ММК находится на стадии развития, имеет ряд проблем и не соответствует потребностям современной молодежи. Из всего многообразия ОП наибольшее распространение получил фаблаб. Иные ОП (амфитеатр, атриум, эко-пространство, многофункциональный зал Blackbox) представлены в малом количестве, имеют несовершенную планировочную структуру.

4. Рассматривая устройство отечественных ММК, можно выделить ряд проблем, связанных с организацией ОП: типовые решения, монофункциональность, отсутствие трансформации,

гибкости планировочной структуры, недостаток социально-ориентированного наполнения для различных категорий населения. Представляется, что в России есть потенциал для развития и формирования системы ОП, предназначенных для организации общения и реализации многосторонних интересов современной молодежи, но для этого предстоит привнести новые архитектурно-планировочные решения и современные технологии в структуру ОП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития молодежи Российской Федерации на период до 2025 года [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://fadm.gov.ru/mediafiles/documents/document/98/ae/98aeadb5-7771-4e5b-a8ee-6e732c5d5e84.pdf> (дата обращения: 12.03.22)
2. Современные принципы работы молодежного центра [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://rcmipp.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2250723.pdf (дата обращения: 12.03.22)
3. Закон г. Москвы от 05.05.2010 №17 «О генеральном плане города Москвы». [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=d oc&base=MLAW&n=183049#05306628327901708> (дата обращения 15.08.2022)

4. Еремеева А.Ф., Лавров Л.П. Городские общественные пространства – открытые и озелененные, их отличительные особенности // Современные общественные пространства как инструмент развития городской среды: материалы межрегион. науч.-практ. конф. 29-30 ноября 2018 г. СПбГАСУ, 2018. С. 53–59.
5. Еремеева А.Ф. Общественные пространства в структуре многофункционального комплекса: современные тенденции организации // Вестник гражданских инженеров. 2020. №4 (81). С. 4-12. doi: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12
6. Сысоева Е.А., Дахнюк К.Н. Принципы формирования общественных пространств для исторической части городов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 2. С. 93–99. doi: 10.17673/ Vestnik.2020.02.13.
7. Гельфонд А.Л. Общественное здание и общественное пространство. Дуализм отношений // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 2. С. 18–31.
8. Палей Е.С. Общественное пространство европейского университета в процессе исторического развития // Архитектон: известия вузов. 2019. № 1 (65). [Электронный ресурс]. URL: http://archvuz.ru/2019_1/3/ (дата обращения: 15.08.22)
9. Баталина Т.С. Анализ особенностей формирования общественного пространства // Бизнес и дизайн ревю. 2017. Т. 1. № 1(5). [Электронный ресурс]. URL: https://obe.ru/journal/2017_1/batalina-ts-analiz-osobennostej-formirovaniya-obshhestvennogo-prostranstva/ (дата обращения: 15.08.22)
10. Ярмош Т.С., Бабаева М. Роль ландшафтной архитектуры в формировании общественных пространств современного города // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 12. С. 102–109. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-102-109
11. Головкин К, Алексеева З. «УРАМ»: как выглядит новый спортцентр в самом большом экстрим-парке Европы [Электронный ресурс]. URL: <https://strelkamag.com/ru/article/uram> (дата обращения: 12.03.22)
12. Ширчков Е.В., Городской амфитеатр в общественном пространстве современных российских городов // Приволжский научный журнал. 2018. № 1. С. 131–139.
13. Гулькова Л.А., Каганович Н.Н. Архитектурно-функциональный потенциал атриумных структур в современных общественных зданиях // Сборник статей VI Международной конференции. Екатеринбург. 2021. С. 110–119.
14. Палей Е.С. Типология многосветных пространств современных университетских кампусов Европы // Реабилитация жилого пространства горожанина: материалы XV междунар. науч.-практ. конф. им. В. Татлина. Пенза. ПГУАС, 2019. С. 121–124.
15. Кожевников А.М. Приемы современной театральной трансформации // Architecture and Modern Information Technologies. 2021. №1(54). С. 165–187. doi: 10.24412/1998-4839-2021-1-165-187.
16. Иванов А.А., Кузнецова Е.Н. Архитектурно-планировочные приемы проектирования общественных пространств в современных культурных центрах // Системные технологии. 2020. № 37. С. 83–93.
17. Борисова К., Журавлев В., Щепочкин В. Центры молодежного технического творчества // Наноиндустрия. 2013. № 2. С. 58–64.
18. Katterfeldt E-S. Designing digital fabrication learning environments for Bildung: Implications from ten years of physical computing workshops // Int J Child-Computer Interaction. 2015. № 5. С. 3–10. doi:10.1016/j.ijcci.2015.08.001
19. Smith R.C., Iversen O.S., Hjorth M. Design thinking for digital fabrication in education // Int J Child-Computer Interaction. 2015. № (5). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/284103213> doi:10.1016/j.ijcci.2015.10.002 (дата обращения: 12.03.22)
20. Федоров О.П., Мухамедзянова А.Р., Черникова Д.А. Типология объемно-пространственных решений городских ферм в современном мегаполисе // Вестник гражданских инженеров. 2020. №1 (78). С. 53–61. doi: 10.23968/1999-5571-2020-17-1-53-61
21. Бикташев А.И., Коломина А.И., Краснобаев И.В. Городские агрофермы как новый тип общественного пространства: совмещение производственного и средообразующего аспектов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 1 (47). С. 46–54.

Информация об авторах

Ивина Мария Сергеевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурного проектирования. E-mail: m.s.ivina@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Рахимова Полина Сергеевна, студент. E-mail: rahimovapolina2000@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 23.12.2022 г.

© Ивина М.С., Рахимова П.С., 2023

***Ivina M.S., Rakhimova P.S.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: m.s.ivina@mail.ru

PUBLIC SPACES IN THE STRUCTURE OF MULTIFUNCTIONAL YOUTH SPACES

Abstract. The article provides a comparative analysis of the experience of designing domestic and foreign public spaces in the structure of multifunctional youth spaces. The topic is relevant because modern public spaces are multifunctional objects in which leisure, cultural, educational and other activities of young people can be implemented. The article determines the types of public spaces such as sports grounds, amphitheater, atrium, fab lab, eco-space, assembly hall, Blackbox hall. The functional composition and planning structure of public spaces, as well as ways of organizing various events are studied. The ways of interaction of public spaces with the structure of the youth spaces are determined. Elements of landscaping are integrated into the structure of the complex. Public spaces can be the main function of the complex (fablab, Blackbox hall), recreational and communication (atrium) or secondary (amphitheater, eco-space). Eco-spaces, presented in the form of urban farms, "green" laboratories are of particular interest. The article shows the specificity of foreign public spaces, which is in interactivity, multifunctionality, versatility, innovative solutions, the use of "green technologies", modern materials and design solutions. Authors reveal the problems in architectural and planning solutions of domestic public spaces such as standard solutions, monofunctionality. The development of architectural and planning solutions for public spaces in the structure of multifunctional youth complexes in accordance with the interests of young people will allow developing various scenarios such as training, self-education, communication, entertainment.

Key words: public spaces, youth complexes, multifunctionality, architectural and planning solutions, activities, foreign and domestic experience.

REFERENCES

1. Strategy for the development of youth of the Russian Federation for the period up to 2025 [Strategiya razvitiya molodezhi Rossijskoj Federacii na period do 2025 goda]. URL: <https://fadm.gov.ru/mediafiles/documents/document/98/ae/98aeadb5-7771-4e5b-a8ee-6e732c5d5e84.pdf> (date of treatment: 12.03.22) (rus)
2. Modern principles of work of the youth center [Sovremennye principy raboty molodezhnogo centra]. URL: https://rcmipp.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_2250723.pdf (date of treatment: 12.03.22) (rus)
3. Law of the city of Moscow dated 05.05.2010 No 17 "On the master plan of the city of Moscow". [Zakon g. Moskvy ot 05.05.2010 №17 «O general'nom plane goroda Moskvy»]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=MLAW&n=183049#05306628327901708> (date of treatment 15.08.2022) (rus)
4. Eremeeva A.F., Lavrov L.P. Urban public spaces - open and landscaped, their distinctive features [Gorodskie obshchestvennye prostranstva - otкрыtye i ozelenennyye, ih otlichitel'nye osobennosti]. Sovremennye obshchestvennye prostranstva kak instrument razvitiya gorodskoj sredy: materialy mezhregion. nauch.-prakt. konf. 29-30 noyabrya 2018 g. SPbGASU, 2018. Pp. 53–59 (rus)
5. Eremeeva A.F. Public spaces in the structure of a multifunctional complex: current trends in the organization [Obshchestvennye prostranstva v strukture mnogofunktsional'nogo kompleksa: sovremennyye tendentsii organizatsii]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2020. No. 4 (81). Pp. 4–12. doi: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-5-12 (rus)
6. Sysoeva E.A., Dakhnyuk K.N. Principles of formation of public spaces for the historical part of cities [Principy formirovaniya obshchestvennykh prostranstv dlya istoricheskoy chasti gorodov]. Urban planning and architecture. 2020. Vol. 10, No. 2. Pp. 93–99. doi: 10.17673/Vestnik.2020.02.13. (rus)
7. Gelfond A.L. Public building and public space. Dualism of relations [Obshchestvennoe zdanie i obshchestvennoe prostranstvo. Dualizm otnoshenij]. Academia. Architecture and construction. 2015. No. 2. Pp. 18-31. (rus)
8. Paley E.S. The Public Space of the European University in the Process of Historical Development [Obshchestvennoe prostranstvo evropejskogo universiteta v processe istoricheskogo razvitiya]. Architecton: proceedings of higher education. 2019. No. 1 (65). URL: http://archvuz.ru/2019_1/3/ (date of treatment: 15.08.22) (rus)
9. Batalina T.S. Analysis of the features of the formation of public space [Analiz osobennostey formirovaniya obshchestvennogo prostranstva]. Business and Design Review. 2017. Vol. 1. No. 1(5).

URL: https://obe.ru/journal/2017_1/batalina-t-s-analiz-osobennostej-formirovaniya-obshchestvennogo-prostranstva/ (date of treatment: 15.08.22) (rus)

10. Yarmosh T.S., Babaeva M. The role of landscape architecture in the formation of public spaces of a modern city [Rol' landshaftnoj arhitektury v formirovaniye obshchestvennykh prostranstv sovremennogo goroda]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 12. Pp. 102–109. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-102-109 (rus)

11. Golovkin K., Alekseeva Z. "URAM": what does the new sports center look like in the largest extreme park in Europe [«URAM»: kak vyglyadit novyy sportcentr v samom bol'shom ekstim-parke Evropy]. URL: <https://strelkamag.com/ru/article/uram> (date of treatment: 12.03.22) (rus)

12. Shirchkov E.V. City amphitheater in the public space of modern Russian cities [Gorodskoy amfiteatr v obshchestvennom prostranstve sovremennykh rossijskikh gorodov]. Privolzhsky scientific journal. 2018. No. 1. Pp. 131–139. (rus)

13. Gulkova L.A., Kaganovich N.N. The architectural and functional potential of atrium structures in modern public buildings [Arhitekturno-funkcional'nyy potencial atriumnykh struktur v sovremennykh obshchestvennykh zdaniyakh]. Sbornik statej VI Mezhdunarodnoj konferencii. Ekaterinburg. 2021. Pp. 110–119. (rus)

14. Paley E.S. Typology of multi-light spaces of modern university campuses in Europe [Tipologiya mnogosvetnykh prostranstv sovremennykh universitetskikh kampusov evropy]. Reabilitaciya zhilogo prostranstva gorozhanina: materialy XV mezhdunar. nauch-prakt. konf. im. V. Tatlina. Penza. PGUAS. 2019. Pp. 121–124. (rus)

15. Kozhevnikov A.M. Techniques of modern theatrical transformation [Priemy sovremennoj teatral'noj transformacii]. Architecture and Modern

Information Technologies. 2021. No. 1 (54). Pp. 165–187. DOI:10.24412/1998-4839-2021-1-165-187 (rus)

16. Ivanov A.A., Kuznetsova E.N. Architectural and planning techniques for designing public spaces in modern cultural centers [Arhitekturno-planirovочnye priemy proektirovaniya obshchestvennykh prostranstv v sovremennykh kul'turnykh centrakh]. System technologies. 2020. No. 37. Pp. 83–93. (rus)

17. Borisova K., Zhuravlev V., Shchepochkin V. Centers of youth technical creativity [Centry molodezhnogo tekhnicheskogo tvorchestva]. Nanoindustry. 2013. No. 2. Pp. 58–64. (rus)

18. Katterfeldt E-S. Designing digital fabrication learning environments for Bildung: Implications from ten years of physical computing workshops. Int J Child-Computer Interaction. 2015. No.5. Pp. 3–10. doi:10.1016/j.ijcci.2015.08.001

19. Smith R.C., Iversen O.S., Hjorth M. Design thinking for digital fabrication in education. Int J Child-Computer Interaction. 2015. No. 5. URL: <https://www.researchgate.net/publication/284103213> doi:10.1016/j.ijcci.2015.10.002 (date of treatment: 12.03.22)

20. Fedorov O.P. Mukhamedzyanova A.R., Chernikova D.A. Typology of volumetric-spatial solutions of urban farms in a modern metropolis [Tipologiya ob'emno-prostranstvennykh reshenij gorodskih ferm v sovremennom megapolise] Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2020. No. 1 (78). Pp. 53–61. doi: 10.23968/1999-5571-2020-17-1-53-61 (rus)

21. Biktashev A.I., Kolomina A.I., Krasnobaev I.V. Urban agricultural farms as a new type of public space: combination of production and environment-forming aspects [Gorodskie agrofermy kak novyy tip obshchestvennogo prostranstva: sovmeshchenie proizvodstvennogo i sredobrazuyushchego aspektov] News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2019. No. 1 (47). Pp. 46–54. (rus)

Information about the authors

Ivina Maria S. PhD, Assistant professor. E-mail: m.s.ivina@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, st. Krasnoarmeyskaya, 4.

Rakhimova Polina S. Student. E-mail rahimovapolina2000@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, st. Krasnoarmeyskaya, 4.

Received 23.12.2022

Для цитирования:

Ивина М.С., Рахимова П.С. Общественные пространства в структуре многофункциональных молодежных комплексов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 67–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-67-76

For citation:

Ivina M.S., Rakhimova P.S. Public spaces in the structure of multifunctional youth spaces. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 67–76. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-67-76

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-77-86

Банцера О.Л., *Касимова А.Р.*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет***E-mail: adema-23352@inbox.ru*

ПРИМЕНЕНИЕ БИОАНАЛОГОВОГО МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МОБИЛЬНЫХ ЖИЛИЩ

Аннотация. Биоаналоговый метод проектирования нацелен на совершенствование архитектурных форм мобильного жилища путем отбора и применения оптимальных природных структур, выработанных в процессе эволюционного развития. В соответствии с этим целью исследования является определение принципов создания мобильных жилищ на основе биоаналогового метода проектирования, а задачей исследования служит изучение особенностей строения живых организмов и функционирования природных систем для определения способов формообразования и конструктивного решения мобильных зданий. Отмечается, что методы архитектурной бионики должны быть направлены на изучение структурных особенностей органических природных систем в течение всего их жизненного цикла. В процессе исследования изучены трансформирующиеся природные модели, способные изменять размеры и вид формы (растения суккуленты, насекомые из отряда чешуекрылых, рыбы семейства иглобрюхих); мобильные природные объекты, обладающие способностью преодолевать расстояния, передвигаясь в пространстве (растения из отдела грибов, животные из отряда членистоногих, пресмыкающиеся из семейства ужесобразных). В результате исследования были определены следующие принципы создания мобильных жилищ – компактность конструктивной формы здания, ее способность к многократной трансформации объема и беспрепятственному передвижению самостоятельно или при помощи кинематических свойств других систем. Для рассмотрения вопросов формообразования в природе и архитектуре взяты опорные формы – конус, спираль, шестигульная призма, сфера и пространственные природные конструкции, такие как – оболочки-скорлупы, ребристые, решетчатые, сетчатые, складчатые и вантовые структуры. На основании исследования разработаны концептуальные модели мобильных временных жилищ для туристов, геологов, исследователей Севера и скотоводов-кочевников.

Ключевые слова: мобильное жилище для временного пребывания, трансформация, мобильность, компактность, архитектурная бионика, биоаналоговый метод проектирования, природные конструкции.

Введение. В настоящее время архитектура временных, быстровозводимых жилых объектов решает проблему обеспечения в сжатые сроки жильем туристов, геологов, исследователей Севера и скотоводов-кочевников, а также при резком изменении природно-климатических условий на планете и возникновении техногенных катастроф.

Временное жилище известно с древних времен. Современные идеи автономных городов и проекты космических модулей берут свое начало с традиционных мобильных жилищ кочевых этносов, которые исторически сложились в кочевых-номадических этнокультурных условиях. На протяжении всего периода существования характерной особенностью временного жилища является его способность к подвижности (мобильность) и трансформация. В настоящее время выделяются следующие типы мобильного дома: жилье, на основе наземного транспортного средства, среди которых гужевые повозки и кибитки; переносное жилье в виде легких быстровозводимых каркасных конструкций примерами которых служат юрты, яранги, чумы, типи и др. (рис. 1) [1]. В ряде некоторых кочевых племен принцип

сооружения подобного дома не претерпел существенных изменений со времен глубокой древности, с XII–IX веков до н.э. и по настоящее время, так как этому способствовали следующие характерные особенности: легкость сооружения, достигаемая за счет применения облегченных конструкций каркасного типа из древесины; типизация элементов конструкции; сборно-разборный тип сооружения, где время сборки и разборки достигало всего нескольких часов; высокие теплотехнические свойства элементов сооружения (войлочное покрытие, оленьи шкуры, циновки, кора), способных сохранять тепло зимой и «дышать» летом. Традиционное мобильное, трансформируемое, сборное жилье по-прежнему востребовано у жителей Севера, в Казахстане, Монголии, Кыргызстане, Туркмении и других странах, где сохранилось пастбищно-отгонное животноводство [2].

В начале 1950-х гг. современная мобильная форма жилья получила новый виток в своем развитии из-за возникшей потребности в создании оптимальной среды обитания человека в условиях передвижения и при обеспечении высокой

степени комфортности жилища (рис. 1). Установлено, что прототипами автодомов, кемперов и караванов служат гужевые повозки и кибитки. Для отечественного опыта данного периода харак-

терно активное проектирование и внедрение модульных зданий в качестве временного размещения рабочих при освоении северных территорий СССР [3].

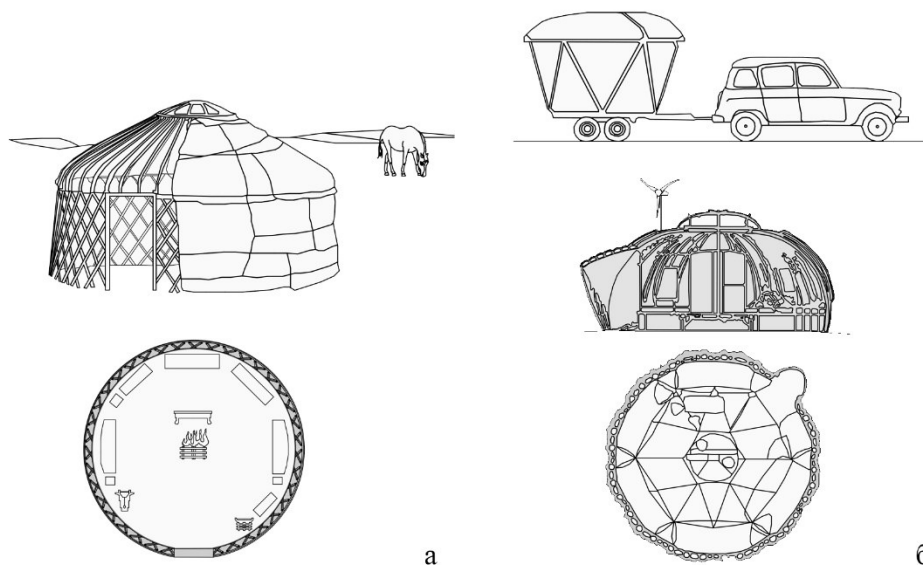


Рис. 1. Примеры мобильных жилищ в древности и современной архитектуре: а – тюркская юрта; б – проект «развертывающегося жилища», арх. Дж. Лоуис, П.М. Перрианд (авторская иллюстрация)

Проектирование мобильных зданий в настоящее время характеризуется внедрением металлических конструкций в качестве материала каркаса и стен, интеграцией современных инженерных систем в мобильные временные сооружения (водоснабжение, отопление, вентиляция, канализация, альтернативные источники энергии, такие как миниветряки и солнечные батареи), а также поиск новых архитектурных форм зданий для улучшения теплотехнических свойств объекта.

В настоящее время накоплен большой теоретический опыт по теме мобильности и трансформации жилых зданий, который заключается в рассмотрении вопросов типологии мобильного жилища для временного пребывания и его классификационных признаков; приспособления жилища к изменяемым потребностям обитателей в результате трансформации внутреннего пространства и достижения его многофункциональности; методики проектирования функционально-пространственных элементов мобильного жилища рекреационного назначения; проектирования автономного резервного мобильного жилища в водной среде, основанных на принципах адаптивной плавучести, трансформативности планировки, а так же вопросов создания автономных жилых зданий в экстремальных условиях природного характера [4–9].

Существует множество решений мобильных жилищ, среди которых разработки объемно-блочного и контейнерного типа, трансформиру-

ющиеся по горизонтали и вертикали, телескопически выдвигаемые и раскладывающиеся и складываемые в пакет здания, динамомобильные сооружения с использованием жёстких и гибких элементов, а также мобильные дома, оснащенные мебелью и оборудованием

В тоже время в результате анализа научных работ и публикаций в области временного мобильного жилья установлено, что недостаточно освещены вопросы архитектурного формообразования мобильных жилищ, не структурированы и не определены основные принципы проектирования временных зданий с обеспечением комфортности внутреннего пространства и учетом сохранения экологии окружающей среды (природного ландшафта, почвенно-растительного покрова). Учитывая уровень научно-технического прогресса, инновационные строительные материалы и технологии, а также применяя современные подходы к проектированию мобильных зданий, многообразие архитектурных форм может быть значительно дополнено.

По мнению Сапрыкиной Н.А. достижения архитектурной бионики способны внести значительный вклад в развитие современной архитектуры. Метод архитектурной бионики заключается в изучении строения биоаналогов для разработки новых и более совершенных конструктивных систем, эффективных материалов и технологий. Отмечается, что с помощью архитектурной бионики возможно решить самые разнообразные

вопросы архитектуры: «... определение дальнейших направлений дифференциации функциональной структуры архитектурных форм и архитектурного пространства; углубление композиционных приемов – тектоники, пропорций, равновесия, симметрии, статики и динамики, метра и ритма, света, цвета; ... рационализация существующих конструктивных решений и внедрение новых конструктивных форм» [10]. Таким образом, представляется целесообразным изучение проблемы мобильного жилья в контексте биоаналогового метода проектирования. В соответствии с этой целью исследования является выявление принципов формирования мобильных жилищ для временного пребывания с помощью биоаналогового метода. Задачей исследования служит рассмотрение способов архитектурного формообразования мобильных жилищ на основе анализа природных систем и живых организмов.

Материалы и методы. Основными методами исследования является биоаналоговый метод проектирования, основанный на изучении принципов построения и функционирования природных систем и живых организмов, а также анализ природных структур для формирования концептуальных решений передвижных мобильных блоков.

Основная часть. Поиск формообразующих возможностей конструкций в конкретных архитектурных формах связан с изучением морфологических характеристик живой природы.

Биоаналоговый метод проектирования заключается не в простом копировании природной формы, а в исследовании законов построения и функционирования объектов живой природы. В этой связи отмечается, что: «В архитектурной бионике исследуется сам процесс жизнедеятельности организмов и растений, способы выживания, выработанные живой природой за многие миллионы лет эволюции. Рассматриваются все этапы жизненного цикла биологических систем от зарождения, роста и развития до размножения и затухания. Только силуэт или контур природных форм не интересуют архитектора. Для создания истинно бионической архитектуры необходимо изучить все процессы, происходящие в интересующем природном объекте-аналоге» [11].

Принципы функционирования природных систем неразрывно связаны с закономерностями их формообразования. Изменение особенностей жизнедеятельности и строения живых организмов складывались под влиянием многих внешних факторов в условиях их постоянного эволюционного развития. Адаптивность живых организмов к различным условиям существования

позволила достичь многообразия природных форм и конструкций.

Для выявления особенностей формообразования выбрано несколько опорных форм, одной из которых является конус (рис. 2). Форма конуса прослеживается в конструктивном построении природных объектов, таких как стебли соцветий и грибов, крона и стволы деревьев. Устойчивость конусообразных форм реализуется в статичном конусе или конусе гравитации, где форма расположена основанием вниз. Подобная конструкция способна оптимально воспринимать действия сил тяжести и ветровые нагрузки [10]. Конус роста или динамичный конус, где основание направлено вверх является выражением начала развития бионических систем. Взаимодействие статичного и динамичного конуса способствует возникновению множества форм в природе.

Спираль аналогично динамичному конусу – это проявление движения, роста и развития природных объектов (рис. 2). Различные виды спиралей оказываются оптимальными для протяженных форм, где посредством закручивания удается достичь компактного плотного состояния при экономном расходовании материала и энергии. Подтверждением этому служат природные формирования, такие как завернутые в разных плоскостях поверхности стеблей растений, лепестки цветов в бутоне, стебли огурцов или тыквы, ножки грибов, а также хвост хамелеона и рога козла, морские раковины, конструкции скелета, опорные кости и конечности животных [12, 14].

Следующей опорной формой выбрана сфера (рис. 2). Конструкции, имеющие форму сферы или приближенные к ней, обладают пространственной компактностью. Сферические формы олицетворяют сосредоточение жизненной энергии. В форме яйца и положении эмбриона человека заключена концентрация данной энергии, в связи с тем, что в подобном состоянии накапливаются, распределяются и сохраняются внутренние жизненные силы [13, 14]. Компактность сферических объемов может характеризоваться показателем компактности, который определяет соотношение площади поверхности вращения к внутреннему объему сферы.

В целом, изучив механизмы образования формы в природе, можно выделить в качестве требований к формированию мобильных жилищ стремление к пространственной конструктивной устойчивости на основе конусообразных форм, динамичности спиральных структур, достижения компактности и экономичности при помощи сферических объемов и шестигранных конструкций.

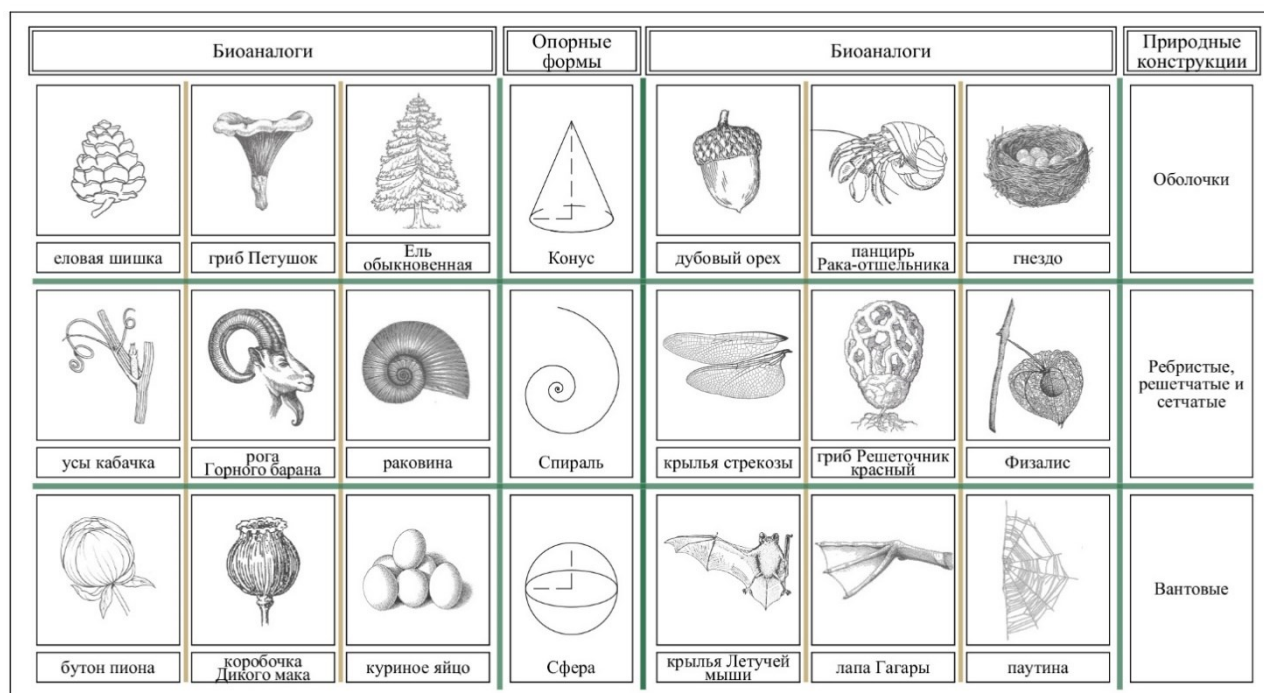


Рис. 2. Графический анализ реализации объемно-пространственных особенностей опорных форм и конструкций в природных биоаналогах (авторская иллюстрация)

Помимо опорных форм существует множество пространственных конструкций отличных по принципу работы, среди них – оболочки, ребристые, решетчатые, сетчатые, складчатые и вантовые структуры (рис. 2). К природным оболочкам относят панцири и раковины животных, скорлупы некоторых растений. Принцип работы подобных оболочек заключается в том, что благодаря пространственно изогнутой форме равномерно распределяются силовые нагрузки по всему сечению вследствие непрерывности и плавности объема [10]. Природные оболочки – сводчатые слоистые конструкции, характеризующуюся большой прочностью, каждый слой оболочки выполняет определенную функцию, что можно наблюдать в яичной скорлупе, состоящей из 7 слоев с общей толщиной 0,3 мм. Тонкая эластичная пленка преобразовывает скорлупу в конструкцию с предварительным напряжением. Предварительно напряженные системы аналогичны природным структурам, работающим по принципу сопротивляемости конструкций по форме. Листья манжетки обыкновенной, бука, лапчатки – это пространственные конструкции, обладающие жесткостью, прочностью за счет своей складчатой формы, способной воспринимать тяжесть во много раз превышающей ее вес [14].

Ребристые, решетчатые и сетчатые природные конструкции также характеризуются достаточной механической прочностью. Принцип построения и работы данных конструкций основан на распределении материала по линиям главных

напряжений, к примеру, это наблюдается в крыльях насекомых и листьях растений пронизанных сетью жилок. Листья тропического растения Виктории регии вырастают до 2-х метров в диаметре и выдерживают вес до 50 кг благодаря крепким и прочным прожилкам – канатам, связанным между собой серповидными поперечными диафрагмами [12, 14]. Природные конструкции и структуры из тонких натянутых нитей и мембран между ними обладают значительной прочностью и являются эффективными решениями для перекрытия больших пространств. Среди подобных природных моделей, в которых применяются натянутые нити (ванты) – паутиные нити, перепончатые лапы водоплавающих птиц, плавники рыб, крылья летучих мышей и др. [14].

В результате анализа природных пространственных конструкций и принципов их построения и работы можно сделать вывод о том, что при создании прочных и эффективных решений конструкций мобильных жилищ целесообразно использовать биоаналоги для решения поставленных задач.

Приспособляемость к изменениям окружающей среды живых организмов наблюдается не только в процессе их эволюционного развития, но и в повседневном функционировании природных систем. Улавливая изменения, происходящие во внешней среде, организмы приспособились регулировать свое положение в пространстве и временно изменять форму. К примеру, растения способны реагировать на динамические

условия среды, будь то это повышение влажности воздуха, освещенности и даже готовность к опылению (рис. 3). Реакция растений заключается в механизме открывания и закрывания цветка, лепестков. В зависимости от времени суток и освещенности изменяют пространственную форму лепестки цикория, мака и шиповника, вслед за солнцем поворачиваются листья белой акации, хлопчатника и соцветие подсолнечника, отвечая на механическое раздражение, складывают листочки актинии, росянка и мимоза [14]. Данные изменения растений осуществляются в основном за счет гибкости и упругости их стволов. В животном мире подобная трансформация связана со строением тела, в особенности панциря, состоящего из повторяющихся сегментов, под которым скрывается упругая кожа и сильные мышцы, способствующие передвижению и защите от хищников. Трансформировать свою пространственную форму способны гусеницы, змеи, ежи, броненосцы, панголины, рыбы семейства иглобрюхих и др. (рис. 3) [13, 14].

Еще одним видом трансформации в природе является особенность организмов при воздействии воды или воздуха регулировать свое внутриклеточное давление. Данный принцип именуется тургором, благодаря которому растения приобретают упругость. Гибкая оболочка природных конструкций характеризуется устойчивостью и прочностью к любым видам нагрузок в силу создаваемого избыточного давления газа или жидкости в теле растения. Особенно ярко эта трансформация проявляется у растений суккулентов, ткани которых насыщены водой, таких как кактус, агавы, очитка, алоэ. Роль тургора важна в формировании живых моделей, у которых отсутствует арматурная ткань – это помидоры, патиссоны, гусеницы, медузы и др. [12, 14].

Принципы трансформации природных конструкций и систем вследствие гибкости и упругости стволов растений, сегментированной

структуре некоторых животных и способности живых моделей изменять свою пространственную форму благодаря регулированию внутриклеточного давления могут быть положены в основу легких, складных, быстро трансформируемых мобильных жилищ с развитием их площади и изменением планировочной организации, а также способностью транспортироваться в сложном компактном состоянии к месту возведения.

Существуют различные способы расселения растений и животных, которые позволяют им захватывать новые участки местности, увеличивая свой ареал обитания.

К кочующим растениям относят легкие по своей структуре культуры, не закрепленные в почве, среди которых грибы и лишайники (рис. 3). Примерами «мобильных» растений служат Пармелия блуждающая, Перекати-поле, Лопух большой, одуванчик и др. В основе строения тела Пармелии легкая, рыхлая структура со множеством мелких вильчато-ветвящихся лопастей, заворачивающихся в трубочки, которую способен поднять и перенести на новое место ветер. В свою очередь от малейшего дуновения плоды одуванчика разлетаются на зонтиках – парашютах. Это происходит благодаря изменению давления воздуха под основанием плодика – семянки, тогда как за счет шаровидной формы Перекати-поле катится и переносит свои семена на дальние расстояния. Перекати-поле – это высохшая форма растений, обладающая сферической формой, образованной густым сплетением мелких побегов или листьев [13]. Помимо легкой, шаровидной формы растения распространяются при участии животных и человека, как в случае с Лопухом большим (Репейник), который путешествует, цепляясь за шерсть и одежду посредством крючков и зацепок.

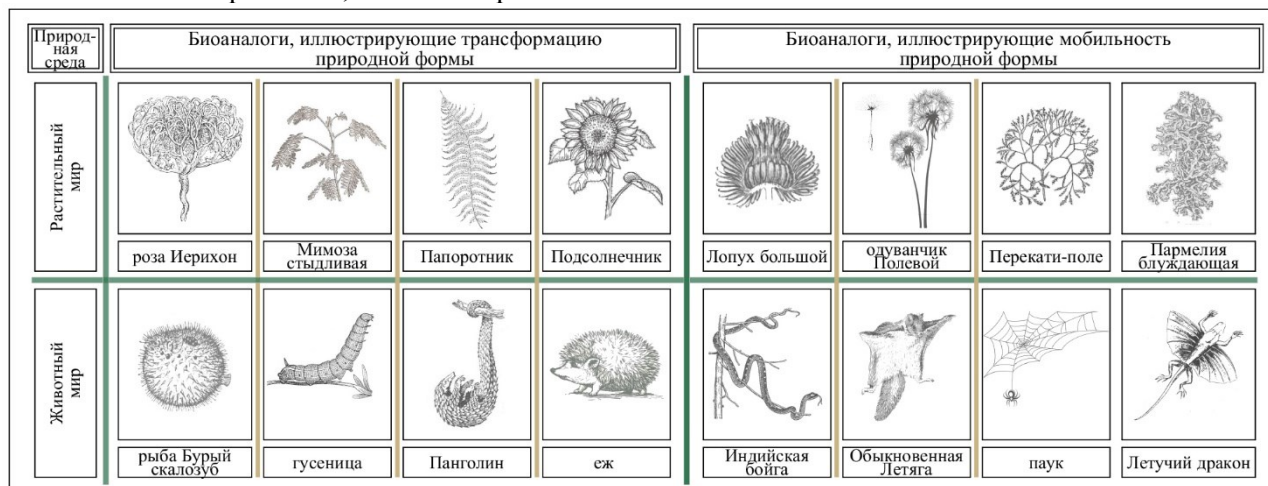


Рис. 3. Принципы формообразования мобильности и трансформации в природе (авторская иллюстрация)

Примерами «мобильных» животных являются пауки, белки-летяги, древесные муравьи и змеи и др. (рис. 3). Пауки для перемещения используют своеобразный легкий «воздушный шар» из паутины, который совместно с животными увлекает ветер, тем самым позволяя планировать между деревьями и перелетать на дальние расстояния. Управляемое парение свойственно древесным муравьям, тело которых превращается в парашют и позволяет им облетать дерево по спирали. Белки-летяги и древесные змеи способны скользить между деревьями путем задействования кожных перепонки между лапами и удачного строения тела с аэродинамической точки зрения, позволяющего опираться на восходящие потоки ветра [15].

Особенности процессов перемещения растений и животных, связанные со строением их тел и различными способами миграции, могут быть взяты за основу создания самодвижущихся, перевозных или переносных мобильных жилищ.

Таким образом, рассмотрев внутреннее и внешнее строение живых организмов и изучив процессы, происходящие в природных системах, можно сделать вывод о том, что принципами формирования мобильных жилищ для временного пребывания являются компактность конструктивной формы, ее способность к многократной трансформации и передвижению (мобильность). На основании этого была сформулирована триада принципов формообразования временных жилищ – компактность, мобильность и трансформация при соблюдении которых достигается сохранение природы и создание устойчивой окружающей среды за счет минимизации антропогенных факторов, таких как изменение структуры земной поверхности, изменение состава биосферы, круговорота и равновесия, составляющих ее веществ (рис. 4).

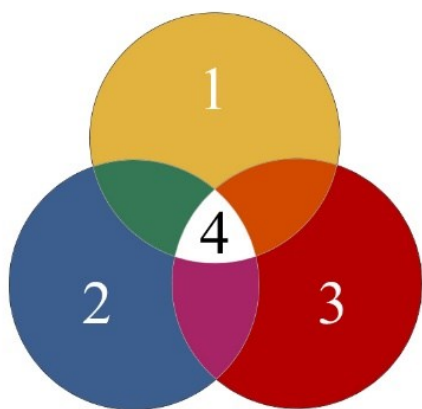


Рис. 4. Триада принципов формообразования мобильных жилищ: 1 – компактность;

2 – мобильность; 3 – трансформация;

4 – сохранение экосистемы (авторская иллюстрация)

Апробация данных принципов путем создания концептуальных проектов мобильных блоков на основе природных аналогов проводилась на кафедре «Архитектура» НИУ МГСУ под руководством профессора Банцеровой О.Л., являющейся основателем творческого объединения бакалавров, магистрантов и аспирантов «Архитектурная бионика», и доцента Касимовой А.Р. В процессе проектирования в качестве биоаналогов были выбраны такие объекты живой природы, как панголины, броненосцы, рыбы из семейства иглобрюхих, одуванчики и различные цветы. Понятие мобильности в проектах было изучено не только с точки зрения передвижения, но и времени, затраченного на трансформацию здания и приведения его в эксплуатационное состояние. Эскизные решения представляют типы мобильных блоков различные по способу перемещения – самоходные, преодолевающие расстояния посредством колес, с помощью свойств своей формы илидвигающиеся в качестве груза. Учитывались принципы формообразования как по отдельности, так и в различных комбинациях – мобильность и компактность, компактность и трансформация.

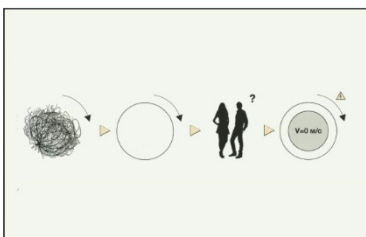
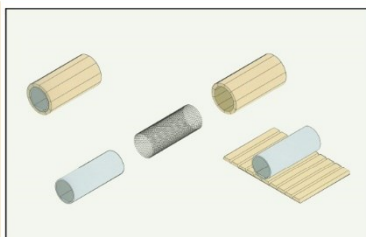
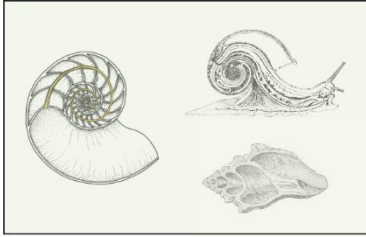
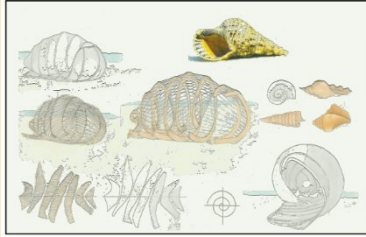
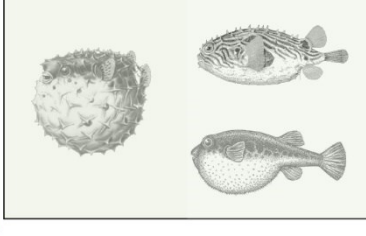
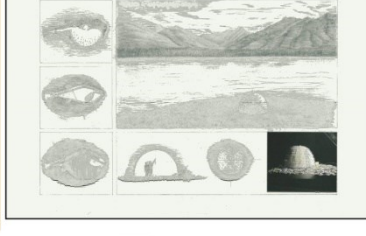
Рассмотрим эти проекты. В первом концептуальном проекте туристской капсулы «Перекасти поле» мобильность осуществляется при помощи формы травянистого растения Перекасти поле. Мобильный блок имеет форму цилиндра, где в центре размещается неподвижное стационарное ядро, внутри которого во время движения находятся люди. Данный блок состоит из следующих оболочек: внутренний модуль из легких материалов по типу пластика; сепараторные шарикоподшипники; внешняя оболочка, защищающая внутренний модуль от повреждений во время движения (рис. 5).

Во втором концептуальном проекте летнего павильона «Морская раковина» предлагается сборно-разборная конструкция блока на основе спирального роста скелета моллюсков – морской раковины. Спиральная форма скелета является результатом скручивания тела моллюсков во время их роста, позволяющая экономно расходовать материал и энергию, достигая при этом конструктивной жесткости и устойчивости объема в пространстве (рис. 5).

Третий концептуальный проект мобильной капсулы для освоения пустынь «Передвижение одуванчика» предусматривает движение блока под воздействием ветровой нагрузки с использованием пневматических устройств для трансформации объема. Биоаналогом данного проекта являются плоды травянистого растения – одуванчика. Мобильный блок не соприкасается с землей, тем самым, сохраняя почвенный покров, и не

требуется для транспортировки применения громоздких технических приспособлений. Конструкция блока состоит из оболочки, покрытой

двумя независимыми друг от друга цепями ячеек, расположенных по спирали. Ячейки заполняются газом при помощи компрессора (рис. 5).

№ п/п	Название проекта	Концептуальный проект		Принципы формообразования
1	Туристическая капсула "Перекати-поле"			  
2	Летний павильон "Морская раковина"			  
3	Мобильный блок для освоения пустынь "Передвижение одуванчика"			  
4	Мобильный пневматический павильон "Рыба Фугу"			  

Условные обозначения:  - мобильность  - компактность  - трансформация

Рис. 5. Концептуальные проекты мобильных блоков на основе биоаналогов (авторская иллюстрация)

Четвертый концептуальный проект мобильного пневматического павильона «Рыба фугу» подразумевает трансформацию мобильного блока за счет эластичности конструкций и объема. Рыба Фугу выступает биоаналогом для данного решения блока, так как она способна растягиваться в три раза и принимать форму шара при возникновении опасности. Мобильный блок представляет собой куполообразную эластичную оболочку, которая при нагнетании воздуха за счет компрессора способна принимать форму шара (рис. 5).

Поисковый характер проектов позволил определить пути формообразования мобильных структур в различных природных условиях с учетом природно-климатических и ландшафтных

характеристик осваиваемых территорий. Биоаналоговый метод проектирования помог найти не только форму объекта, но и его конструктивное решение, материалы и эффективные технологии.

Выводы. В результате анализа живых организмов были выявлены принципы формирования мобильных жилищ для временного пребывания, такие как компактность конструктивной формы, способность здания к многократной трансформации и передвижению. Реализация данных принципов в архитектурном проектировании осуществляется путем использования физических свойств природных объектов с учетом особенностей их функционирования. Прочные и динамичные структуры проектируемых зданий могут быть разработаны на основе конусообразных и спиральных систем, а также с использованием

природных пространственных конструкций в виде оболочек-скорлуп, ребристых, решетчатых структур. Компактность объема зданий возможно достичь благодаря использованию таких опорных форм, как сфера или шестиугольная призма. Трансформация и способность к перемещению в сложенном состоянии характерна для объектов, обладающих сегментированной структурой и гибкими, упругими элементами конструкций. Мобильность жилых объектов обеспечивается формированием легкой, разветвленной структуры шаровидной формы или созданием системы по образу летательных аппаратов животных. Использование биоаналогового метода для проектирования мобильных жилищ будет способствовать расширению многообразия архитектурных форм и удовлетворению современным требованиям, предъявляемым к мобильным объектам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мироненко В.П., Цымбалова Т.А. Мобильное жилище для мигрантов // International Scientific and Practical Conference World science. 2018. Т.1. № 4(32). С. 42–50.
2. Банцеров О.Л., Касимова А.Р. Специфика развития этнокультурного туризма в системе формирования этнокультурных кластеров // Научное обозрение. 2016. № 17. С. 90–98.
3. Сапрыкина Н.А. Мобильное жилище для Севера. Л.: Стройиздат, 1986. 213 с.
4. Панфилов А.В. Особенности формирования мобильного жилища для временного пребывания: конец XX– начало XXI века: автореф. дис. ... канд. арх.: 05.23.21 / А.В. Панфилов. М., 2013. 26 с.
5. Анисимов Л.Ю. Принципы формирования архитектуры адаптируемого жилища: автореф. дис. ... канд. арх.: 18.00.02 / Л.Ю. Анисимов. М., 2009. 30 с.
6. Поморов С.Б. Второе жилище горожан компенсационного типа: автореф. дис. ... д-ра. арх.: 18.00.02 / С.Б. Поморов. М., 2005. 66 с.
7. Экономов И.С. Принципы формирования малоэтажных жилых объектов на воде: автореф. дис. ... канд. арх.: 05.23.21 / И.С. Экономов. М., 2010. 36 с.
8. Кизилова С.А. Принципы формирования резервного мобильного жилища в водной среде: автореф. дис. ... канд. арх.: 05.23.21 / С.А. Кизилова. М., 2021. 31 с.
9. Погонин А.О. Принципы формирования автономных жилых зданий в экстремальных условиях природного характера: автореф. дис. ... канд. арх.: 05.23.21 / А.О. Погонин. М., 2010. 30 с.
10. Сапрыкина Н.А. Основы динамического формообразования в архитектуре. М.: Архитектура-С, 2005. 311 с.
11. Принципы формирования устойчивого развития в архитектуре [Электронный ресурс] / Т.Р. Забалуева, А.Е. Балакина, О.Л. Банцеров, А.В. Захаров. М.: Издательство МИСИ-МГСУ, 2022. 81 с. URL: <http://lib-04.gic.mgsu.ru/lib/2022/89.pdf> (дата обращения 20.11.2022).
12. Архитектурная бионика // под ред. Ю. С. Лебедева. М.: Стройиздат, 1990. 269 с.
13. Касимова А.Р. Архитектурное формирование этнокультурных туристских кластеров: на примере Российско-Казахстанского приграничного региона: дис. ... канд. арх.: 2.1.12 / А.Р. Касимова. Нижний Новгород, 2021. 482 с.
14. Мастерская природы // Авт. - сост. и автор текста З. Воронцова. М.: Изобразительное искусство, 1981. 32 л.
15. Как летают пауки [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/news/26831/> (дата обращения 20.11.2022).

Информация об авторах

Банцеров Ольга Леонидовна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры. E-mail: olga.bancerova@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Касимова Адема Рамазановна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры. E-mail: adema-23352@inbox.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 30.11.2022г.

© Банцеров О.Л., Касимова А.Р., 2023

Bantserova O.L., *Kasimova A.R.

National research Moscow state University of civil engineering

*E-mail: adema-23352@inbox.ru

APPLICATION OF THE BIO-ANALOGUE DESIGN METHOD IN THE FORMATION OF MOBILE DWELLINGS FOR TEMPORARY STAY

Abstract. The bio-analogue design method is aimed at improving the architectural forms of a mobile home by selecting and applying optimal natural structures drawn up in the process of evolutionary development. Accordingly, the purpose of the study is to determine the principles of creating mobile homes based on the bio-analogue design method. The research task is to study the features of the structure of living organisms and the functioning of natural systems to determine the ways of shaping and constructive solutions of mobile buildings. It is noted that the methods of architectural bionics should be aimed at studying the structural features of organic natural systems throughout their life cycle. In the course of the study, transforming natural models capable of changing the size and type of shape are studied (succulent plants, insects order the Lepidoptera, the family puffers); mobile natural objects with the ability to overcome distances by moving in space (plants from the fungi department, animals from the arthropod order, reptiles from the grass snake family). In result, the following principles of creating mobile homes are determined: compactness of the structural form of the building, its ability to repeatedly transform the volume and unhindered movement independently or with the help of kinematic properties of other systems. To consider the issues of shaping in nature and architecture, reference forms are taken - a cone, a spiral, a hexagonal prism, a sphere and spatial natural structures, such as shells, ribbed, lattice, mesh, folded and cable-stayed structures. Based on the research, conceptual models of mobile temporary dwellings for tourists, geologists, researchers of the North and nomadic pastoralists have been developed.

Keywords: mobile dwelling for temporary stay, transformation, mobility, compactness, architectural bionics, biosimilar design method, natural structures.

REFERENCES

1. Mironenko V.P., Cymbalova T.A. Mobile housing for migrants [Mobil'noe zhilishche dlya migrantov]. International Scientific and Practical Conference World science. 2018. Vol. 1. No. 4 (32). Pp. 42–50. (rus)
2. Bancerova O.L., Kasimova A.R. Peculiarity of ethnocultural tourism development in the system of recreation clusters formation [Specifika razvitiya etnokul'turnogo turizma v sisteme formirovaniya etnokul'turnyh klasterov]. Nauchnoe obozrenie. 2016. No. 17. Pp. 90–98. (rus)
3. Saprykina N.A. Mobile home for the North [Mobil'noe zhilishche dlya Severa]. Leningrad: Stroizdat. 1988. 213 p. (rus)
4. Panfilov A.V. Features of the formation of a mobile home for temporary stay: the end of the XX – beginning of the XXI century [Osobennosti formirovaniya mobil'nogo zhilishcha dlya vremennogo prebyvaniya: konec XX – nachalo XXI veka]: avtoreferat dissertacii kandidata arhitektury: 05.23.21. Moscow. 2013. 26 p. (rus)
5. Anisimov L.YU. Principles of the formation of the architecture of an adaptable home [Principy formirovaniya arhitektury adaptiruemogo zhilishcha]: avtoreferat dissertacii kandidata arhitektury: 18.00.02. Moscow. 2009. 30 p. (rus)
6. Pomorov S.B. The second dwelling of citizens of the compensatory type [Vtoroe zhilishche gorozhan kompensacionnogo tipa]: avtoreferat dissertacii doktora arhitektury: 18.00.02. Moscow. 2005. 66 p. (rus)
7. Ekonomov I.S. Principles of formation of low-rise residential buildings on the water [Principy formirovaniya maloetazhnyh zhilyh ob"ektov na vode]: avtoreferat dissertacii kandidata arhitektury: 05.23.21. Moscow. 2010. 36 p. (rus)
8. Kizilova S.A. Principles of formation of a backup mobile home in the aquatic environment [Principy formirovaniya rezervnogo mobil'nogo zhilishcha v vodnoj srede]: avtoreferat dissertacii kandidata arhitektury: 05.23.21. Moscow. 2021. 31 p. (rus)
9. Pogonin A.O. Principles of formation of autonomous residential buildings in extreme natural conditions [Principy formirovaniya avtonomnyh zhilyh zdaniy v ekstremal'nyh usloviyah prirodnogo haraktera]: avtoreferat dissertacii kandidata arhitektury: 05.23.21. Moscow. 2010. 30 p. (rus)
10. Saprykina N.A. Fundamentals of dynamic shaping in architecture [Osnovy dinamicheskogo formoobrazovaniya v arhitekture]. Moscow: Arhitektura-S. 2005. 311 p. (rus)
11. Principles of formation of sustainable development in architecture [Principy formirovaniya ustojchivogo razvitiya v arhitekture]. T.R. Zabalueva, A.E. Balakina, O.L. Bancerova, A.V. Zaharov. Moscow: Izdatel'stvo MISI-MGSU. 2022. 81 p. URL: <http://lib-04.gic.mgsu.ru/lib/2022/89.pdf> (accessed 20.11.2022). (rus)

12. Architectural Bionics [Arhitekturnaya bi-onika]. pod red. YU. S. Lebedeva. Moscow: Stroiizdat. 1990. 269 p. (rus)

13. Kasimova A.R. Architectural formation of ethno-cultural tourist clusters: on the example of the Russian-Kazakh border region [Arhitekturnoe formirovanie etnokul'turnyh turistskih klasterov: na primere Rossijsko-Kazahstanskogo prigranichnogo

regiona]: dissertaciya kandidata arhitektury: 2.1.12. Nizhnij Novgorod. 2021. 482 p. (rus)

14. Nature Workshop [Masterskaya prirody]. Avt. - sost. i avtor teksta Z. Voroncova. Moscow: Izobrazitel'noe iskusstvo. 1981. 32 p. (rus)

15. How spiders fly [Kak letayut pauki] URL: <https://www.nkj.ru/news/26831/> (accessed 20.11.2022). (rus)

Information about the authors

Bantserova, Olga L. PhD, Assistant professor. E-mail: olga.bancerova@gmail.com. National research Moscow state University of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Kasimova, Adema R. PhD, Assistant professor. E-mail: adema-23352@inbox.ru. National research Moscow state University of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Received 30.11.2022

Для цитирования:

Банцеров О.Л., Касимова А.Р. Применение биоаналогового метода проектирования при формировании мобильных жилищ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 77–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-77-86

For citation:

Bantserova O.L., Kasimova A.R. Application of the bio-analogue design method in the formation of mobile dwellings for temporary stay. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 77–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-77-86

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-87-96

¹Большаков А.Г., ²*Тикунова С.В.¹Иркутский национальный исследовательский технический университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: svetlanatikunova@yandex.ru

ПРИНЦИПЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПАРКА В АКАДЕМГОРОДКЕ ГОРОДА ИРКУТСКА

Аннотация. Рассматривается проблема сохранения и преобразования существующего дендропарка и естественного леса в условиях городской застройки срединной зоны города. Парк расположен в научном городке Сибирского отделения академии наук в г. Иркутске. Территория обладает свойствами пейзажного парка. Вместе с тем она активно используется как прогулочная зона и для спортивных занятий. В связи с тем, что парк окружен интенсивной городской застройкой, существуют риски использования земли под жилищное строительство. В работе доказываются его рекреационная и архитектурно-ландшафтная ценность. Основой пространственной структуры служат особенные сочетания полян и лесных насаждений парка. Система пешеходных дорожек, которая формировалась в течение 60 лет, представляет собой живописную сеть, которая на первый взгляд кажется случайной. Изучение территории позволило выявить закономерности организации сети. Лесной массив рассечен автомобильной дорогой. Для пересечения автодороги пешеходами и велосипедистами в проекте предложен велопешеходный мост. Конструкция и архитектурная форма моста минимизируют воздействие на ландшафт данного сооружения. Мост решен как две спирали, подвешенные на две высокие мачты. При длине в 210 м, он занимает площадь радиусом менее 20 метров. Микрорельеф на склоне холма, представленный микроразделами и ложбинами позволяет дифференцировать новые посадки в парке согласно свойствам ландшафта, обусловленным этим микрорельефом.

Ключевые слова: пространственная структура парка; взаиморасположение полян и насаждений; тропиновая сеть; конфигурация пешеходной активности; влияние микрорельефа на проект насаждений; подвесной спиральный мост, принцип ландшафтообразности.

Введение. Лес в Академгородке является важным звеном в лесопоясе и в природном каркасе города Иркутска. В начале 1960-х годов, создавая Иркутский научный центр Сибирского отделения наук, разработчики проекта руководствовались принципами, схожими с теми, что лежали в основе Новосибирского академгородка: научные институты и жилые дома расположены в лесном массиве.

Иркутский Академлес с северо-востока ограничен городской улицей Лермонтова, с юго-запада коттеджным поселком. По продольной оси лес пересекает дорога под названием улица Фаворского. Участок леса имеет сложные границы, напоминающие «бабочку». «Тело бабочки» заключено между улицами Фаворского и Лермонтова. У бабочки два крыла. Северное крыло простирается к району Университетскому вдоль улицы Улан-Баторской, южное крыло расположено вдоль улицы Фаворского.

Академлес расположен на восточном склоне холма и занимает площадь 63 га. «Крылья леса» покрывают сосново-березовые насаждения естественного происхождения. «Тело», т.е. нижний межмагистральный участок представляет собой искусственные посадки деревьев – интродуцентов. Авторы посадок под руководством Белова А.В. в 1960–1970-е годы создали пейзажные ком-

позиции. Для города Иркутска настоящий лесопарк представляет большую ценность. Это единственный, пока не оформленный юридически парк, который имеет живописную планировку и пейзажный, нерегулярный характер композиции насаждений [1–3].

Над парком возникла угроза застройки и не обдуманного «благоустройства», разработанного по инициативе администрации города Иркутска [4–5]. В частности, в лес внедряется велосипедное кольцо правильной геометрической формы в виде прямоугольника с двумя полуокружностями по краям, под которое пришлось бы рубить деревья. При этом существующий ландшафт во внимание не принимается. Наш проект имеет целью снять возникшие в связи с проектом благоустройства городской администрации риски, угрожающие лесу, а цель научного исследования – реализация адаптивного развития объекта (академического леса).

По опушке леса и по фронту улиц Лермонтова, Улан-Баторской и Фаворского расположены здания шести институтов академии наук. Общая площадь участков институтов, входящих в состав лесистой территории – 12,8 га., т.е. 20 % общей площади леса. Парк используется жителями академгородка и города Иркутска для прогулок, для скандинавской ходьбы. Спортцентр

ИГУ использует лес для тренировок и соревнований по спортивному ориентированию. На перегибе «крыльев» по склону устроена любительская горнолыжная трасса.

Для выявления пространственной структуры леса – а именно этот аспект лежит в основе нашей проектной концепции – был сформирован чертеж существующей массо-пустотной схемы территории [7]. В качестве пустот выступают поляны. В качестве масс – выступают лесные насаждения (рис.1). Основные поляны – безлесные травяные поверхности – находятся в нижней части парка. Первая поляна – это полоса, которая примыкает к улице Лермонтова, площадью 8,4

га. На ней сформированы группы деревьев. Вторая поляна – территория горнолыжной трассы. Она располагается в верхней части парка и делит эту часть на два крыла – южное и северное. Горнолыжная трасса – поляна – имеет протяженность около 400 метров. Ширина поляны 80–90 метров, т.е. площадь составляет 3,2 га. Вершина трасса находится на верхнем краю леса, на отметке 530 м. Нижняя граница трассы находится недалеко от улицы Фаворского в районе института Солнечно-земной физики на отметке 485 м. Перепад высот на второй поляне составляет 45 м. Имеются еще две поляны меньшего размера.



Рис. 1. Массо-пустотная схема парка – древесные насаждения и поляны

Плотные лесные насаждения находятся на крыльях парка. В нижней части парка массо-пустотная схема характеризуется равновесием площадей полян и лесных участков и лесных групп. Массив в верхней части парка характеризуется доминированием березы повислой. Участки сосны обыкновенной большей частью расположены в южном крыле. Они занимают около половины его площади. Сосна в северном крыле встречается спорадически. В «теле бабочки» преимущественно искусственные насаждения интродуцентов. Всего в нижней части парка, произрастают 169 деревьев, принадлежащих 26 видам [8, 9].

Тропиночная сеть академического дендропарка характеризуется сложностью и минимальной регулярностью. Это идеальная основа для парка живописной, или пейзажной планировки. Пейзажные парки – высшая категория садово-паркового искусства. В нашей стране, есть замечательные примеры пейзажных парков. Это Павловский парк и Гатчинский парк в – императорские резиденции в пригородах Санкт-Петербурга. Главный входной узел находится на улице Лермонтова, на остановочном пункте «19-я школа» (рис. 2)



Рис. 2. Тропиночно-дорожная сеть. Оценка интенсивности движения

Среди перечисленных шести основных ребер тропинойной сети участок №4 от центрального кольца до институтов географии и лимнологии является самым интенсивным по движению. $37 \times 8 = 296$ чел./день. Интенсивность движения по сети Академического дендропарка отражена толщиной линий, образующих сеть (рис. 2).

Основу пейзажной композиции составляют три элемента: рельеф, деревья и травяные покровы. Роль рельефа рассмотрена в собственно проектной части работы. Изучены соотношения деревьев и травяных поверхностей – полей. Типы композиций по данной паре отношений характеризуются следующим образом: 1) в нижней части парка группы деревьев «плавают» в открытом пространстве полей; 2) в южном крыле куртины хвойных (преимущественно сосновых) насаждений расположены в массиве березы повислой; 3) фронтальные композиции: ленточный лес сопровождает вытянутые поляны на склоне – вдоль горнолыжной трассы.

Поляны являются ядрами пейзажных композиций, поскольку только на полянах открывается вид на большой или малый фрагмент леса. Крупные полянные комплексы расположены в нижней части парка вдоль улицы Лермонтова, на горнолыжной трассе и в районе институтов географии и лимнологии. Небольшие поляны расположены в конце южного крыла парка. В существующей организации пространства парка характерно также то, что через существующие поляны (бассейны видимости) проходят основные дорожки.

К опорным элементам парка относятся: рельеф и пути движения; пустоты – поляны; древесные насаждения в разных конфигурациях и видовом составе. Функционально-пространственными опорными элементами являются: входной узел с остановки общественного транспорта «19 школа»; участки институтов и их контакт с пространством леса; горнолыжная трасса – центральное ядро парка; существующая тропиная сеть с дифференцированными по интенсивности движения участками; лесные насаждения и поляны.

Материалы и методы. Метод ландшафтообразности в градостроительстве известен в науке благодаря [10–12]. В ходе проведенного исследования авторами были выявлены специфические для территории проблемы, направленные на решение задач рационального использования рельефа, сохранения структур полей и насаждений, в усовершенствовании покрытий пешеходных дорожек без изменения конфигураций тропинойной сети.

В основу генерального плана академического дендропарка положена идея его пространственной структуры, которая сохраняет сложившийся лес, развивает его тип как ландшафтного пейзажного сада, а также идея повышения статуса парка за счет его большей привлекательности, посещаемости и научно-образовательного потенциала (рис. 3). Далее приведены приемы решения поставленных задач:

1. Сохранить пространственную и геоботаническую структуру леса возможно, если планировочную структуру, пространственные конфи-

гурации путей и расположение объектов поставить в зависимости от топологии и конфигурации существующей сети, что и показано в генеральном плане.

2. Научно-образовательный статус поможет повысить создание в парке лектория на участке института геохимии, геометрически на пересечении поперечной оси института геохимии и продольной оси института земной коры. Лекторий имеет форму амфитеатра диаметром 10 м.

3. Повысить посещаемость и комфортность парка позволит развитие горнолыжной базы в составе спортзала, раздевалок, душевых кабин и туалетов, кафе и зала для отдыха, с кабинетом медицинского обслуживания. В составе блока помещений также общественный туалет на 24 места. Общие габариты одноэтажного здания спортивного и общественного центра 12Х36 м.

4. По предложению ранее выполненного проекта в составе парка строится велосипедная трасса. Что принципиально важно, в отличие от вышеупомянутого проекта [6], наша трасса проектируется не в форме правильного кольца (прямоугольник с двумя полукружьями), а в точности повторяет существующие конфигурации отдельных участков тропинойной сети, позволяющих

трассу сделать замкнутым контуром. Дорожки, образующие замкнутый многоугольник, получают усовершенствованное покрытие, возможность безопасного движения и пересечения путей пешеходов и велосипедистов.

Первая очередь кольца расположена в нижней части парка, между улицами Лермонтова и Фаворского. Предусмотрено развитие велопешеходной трассы на верхней части парка, за улицей Фаворского. То, что трасса планируется на основе уже существующей тропинойной сети, позволяет не вырубать просеки в лесу под новые велосипедные кольца.

5. Связь нижнего кольца с верхними двумя кольцами с переходом через улицу с автомобильным движением может быть осуществлена только при условии строительства велопешеходного моста через улицу Фаворского. Мост проектируется подвесным, в вантовых конструкциях, что минимизирует соприкосновение сооружения с почвенно-растительным покровом (рис. 4). Мост должен позволять также обеспечить доступ в парк, и в том числе в его верхнюю часть, инвалидам-колясочникам. Таковы требования современного законодательства в сфере безбарьерной городской среды [13].



Рис. 3. Генеральный план академического парка в Иркутске. Автор Большаков А.Г. Красным показано главное вело-пешеходное кольцо.

Основная часть. Рельеф в парке имеет уклон, улица Фаворского идет вдоль склона, поэтому перепад высот на придорожных участках

превышает два метра. Высота подъема над улицей с автобусным движением (в микрорайон Березовый) должна составлять минимум 3,5 метра (исходя из габарита автобуса по высоте 3 метра).

Крутизна подъема на вершину моста не должна превышать 10 %. Что определяет общую длину моста в 210 м.

7. Рядом с общественным спортивным центром предусмотрена автостоянка на 8 легковых автомобилей и на 2 автобуса.

Кроме велосипедных дорожек усовершенствованное покрытие (битый кирпич на геотекстиле) получают главные пешеходные дорожки, охватывающие на перспективу всю площадь парка. Первая очередь велосипедного кольца располагается в нижней части парка. По нему в равной степени предполагается движение пешеходов в режиме прогулки и скандинавской ходьбы.

Вторая очередь велосипедного кольца предполагается в верхней лесистой части парка.

На генеральном плане показано расположение велосипедного кольца на основе существующей тропинойной сети, без вырубки новых просек и нарушения живых покровов парка [14]. Верхняя и нижняя часть кольца должны быть связаны мостом. Поскольку парк разрезается автомобильной дорогой по улице Фаворского, которая пересекает парк на две части.

К объектам парковой инфраструктуры относятся:

1. Велосипедные кольца вдоль всей трассы оборудованы наружным освещением, парковой мебелью (скамейками, беседками), урнами. Схема расположения показана на генеральном плане.

2. Мост. Для безопасного преодоления пешеходами и велосипедистами, инвалидами-колясочниками автодороги по ул. Фаворского, предлагается эскизный проект велосипедного моста. План велосипедного моста решается как спираль со смещенными витками. В плане мост имеет два витка по типу серпантинного подъема с нижней части парка на верхнюю часть за дорогой. Как уже было сказано, для обеспечения нормативного уклона для движения велосипедистов и инвалидов-колясочников уклон моста составляет 4,5 градуса.

В нижней части площадки отметка 476 м, в верхней части 488 м. Если принять уклон моста не более 10 % (4,5 градуса), то его длина должна быть не менее 210 метров. При вытягивании такой протяженности в линию, и при выборе сточно-балочной схемы конструкции моста, для него понадобится более семидесяти опор. Это большой объем земляных работ. И линейная конфигурация моста некомпактно располагается в парке, поперек автодороги. Поэтому было принято решение его свернуть в спираль и применить всего две опоры для подвешивания моста на

вантах. Два витка спирали радиусом 15 и 18 метров сдвинуты друг от друга в направлении склона. Над автодорогой низ конструкции моста возвышается на 3,5 метра. Высота мачтовых опор более 30 метров.

В плановой проекции две замкнутые петли (разомкнутые в пространстве) позволяют подвесить мост всего к двум опорным мачтам (рис. 4) высотой 34 и 30 метров, которые удерживают на тросах пролетное строение моста, закрученное в две спирали. Кольца спирали не стягиваются к центру от натяжения тросов благодаря тому, что между кольцом проезжей части и мачтой установлены металлические спицы, как у велосипедного колеса. Мост предлагается шириной 2,5 метра, как и ширина велосипедного кольца. Покрытие моста из полимера. Покрытие велосипедной дорожки из битого кирпича на геотекстильной подложке.

3. Велосипедная дорожка обустраивается парковой мебелью (скамейки, урны). В зависимости от существующего ландшафта обустраивается как аллея, в этом случае по сторонам дорожки высаживаются дополнительные деревья. Там, где дорожка проходит по открытому пространству, которое по генеральному плану остается как поляна, деревья не высаживаются.

4. На главных дорожках генерального плана усовершенствуется покрытие. Проект предусматривает минимизацию земляных работ. В поперечном профиле вдоль дорожки выкапываются минимального сечения кюветы 100×200 мм для поверхностного стока. Под ними на глубину 30–40 см закладываются траншеи для прокладки кабеля электроосвещения. Вынутый минимальный объем грунта используется на поверхности дорожек для погашения мелких неровностей. Затем дорожка выстилается по всему профилю геотекстилем. На геотекстиль отсыпается мелкий щебень слоем в среднем 50 мм и слой битого кирпича (теннисит) 80 мм.

Главным сооружением парковой инфраструктуры является мост, который предлагается построить, чтобы связать нижнюю часть парка с верхней, поскольку они разделены в настоящее время автодорогой по улице Фаворского. Мост должен быть доступным не только для велосипедистов и пешеходов, но и для инвалидов-колясочников. Разница в отметках между придорожными территориями выше Фаворского и ниже Фаворского составляет 12 м (рис. 4).

Ландшафт академического дендропарка в качестве основы имеет склон холма восток-северо-восточной экспозиции. В нижней части которого лежит микрорайон Академгородок (рис. 5).



Рис. 4. Общий вид велопешеходного спирального моста через автодорогу. Архитектор Большаков А.Г., 2020

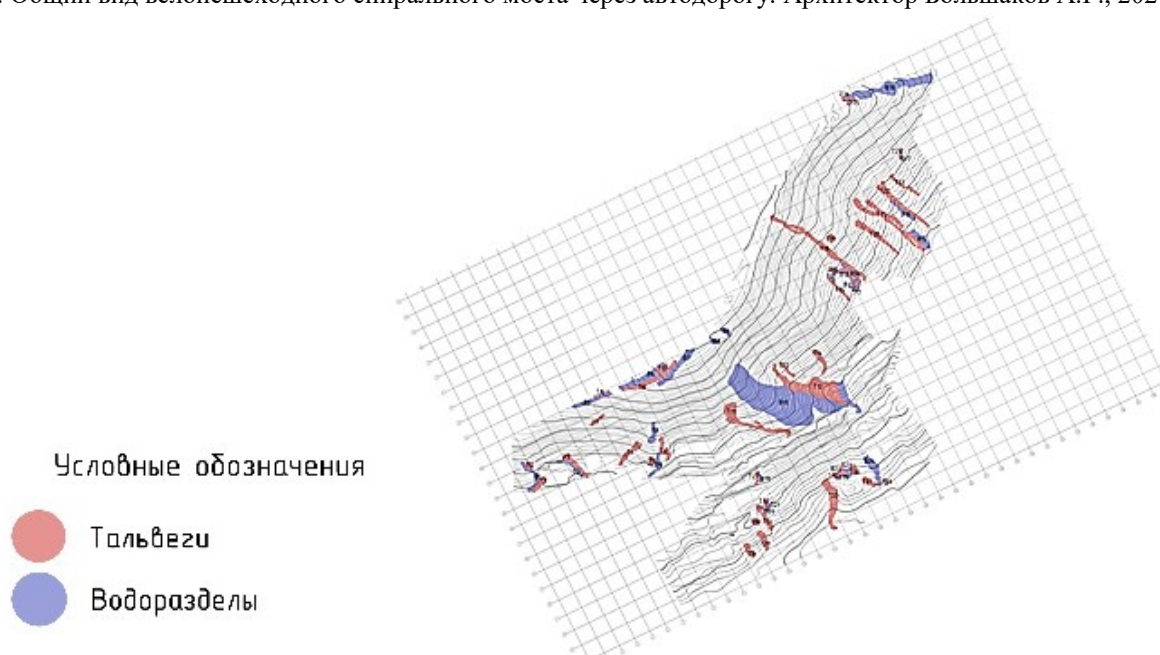


Рис. 5. Элементы микрорельефа на склоне парка. Тальвеги и микроводоразделы. Карта-схема Большакова А.Г.

Проектируемый парк отделяется от микрорайона улицей Лермонтова, идущей вдоль склона. Склон имеет небольшой средний уклон 10 %, который становится круче в верхней части парка, и достигает 16 % при отметке верхнего гребня 531 м и нижней границы по улице Лермонтова 460 м, перепаде высот 71 м, заложении 700 м (ширина парка). В длину парк имеет 1,5 км.

Склон осложнен формами микрорельефа: тальвегами и микроводоразделами. Тальвеги представлены ложбинами, микроводоразделы – грядами и буграми. Согласно научным положениям ландшафтоведения о решающем влиянии рельефа на территориальную структуру микро- и мезоландшафтов [15–19], выделяем ложбины и водоразделы как основу дифференциации микроландшафтов на общем ландшафном фоне гладкого склона. Поэтому в ложбинах парка формируются пейзажные композиции с участием влаголюбивой травяной растительности, многолетних цветковых растений. На водоразделах с более развитыми процессами аэрации, т.е. на более

сухих поверхностях предпочтительно высаживать деревья, преимущественно сосну. На опушках полей допускается наибольшее разнообразие древесно-кустарниковых и травянистых растений [20, 21].

На рис.6 показана композиция лесной аллеи в расположении поперек водораздела. На рис.7 показана композиция нижней части ложбины.

Соответственно принципиальным отличиям микроландшафтов в аспекте увлажненности и режимов накопления (тальвег, ложбина) и транзита (смыва) материала были предложены примерные пейзажные композиции – растительные ассоциации трав, кустарников и деревьев, которые рекомендуются для насаждения соответственное в ложбинах и на микроводоразделах [22–24].

В работе приведены проектные примеры групп древесно-кустарниково-травяных насаждений для выделенных в академическом парке микроландшафтов. Из деревьев рекомендуются

породы: ель, береза, пихта, лиственница, из кустарников: черемуха, акация, боярышник, клен Гинала, кизильник.



Рис. 6. Пейзажная композиция на микроводоразделе. Преимущественно древесные насаждения



Рис.7. Пейзажная композиция в нижней части ложбины

Выводы.

Таким образом, в соответствии с целью адаптивного развития академического дендропарка разработан эскизный проект, основой которого является сохранение и приумножения ландшафтного потенциала академического леса средствами артикуляции существующих ландшафтов.

Социально-пространственная основа парка – пути движения, времяпрепровождение людей в парке воплощается в структуре дорожно-тропиночной сети, в основе которой лежат существующие тропы. У главных существующих дорожек предложены усовершенствованные покрытия с минимальным воздействием на землю. В соответствии с социальным запросом академического сообщества предложен амфитеатр с летним покрытием для проведения образовательных практик. В соответствии с социальным запросом жителей микрорайона Академгородок разработано приспособление существующей тропиночной сети для формирования велосипедного кольца.

Для обеспечения безопасности перемещения людей в парке из его нижней части в верхнюю и обратно предложен подвесной мост через

существующую в парке автодорогу с интенсивным автомобильным движением (улицу Фаворского). Мост имеет параметры, соответствующие уклонам местности и нормативам движения по мосту инвалидов-колясочников в соответствии с действующим законодательством.

Важное функциональное ядро парка – горнолыжная трасса. Предложено обеспечение функций на лыжной базе в виде помещений раздевалок, кафе, пункта аренды инвентаря и общественных туалетов на улице Фаворского. Здесь же формируются требуемые автостоянки для легковых автомобилей и автобусов

Принцип ландшафтосообразности в проекте академического парка состоит в том, что:

- основой для проектирования являются существующие ландшафты. Важнейшим аспектом пространственной структуры ландшафтов служат – массо-пустотные отношения, или отношения лесных насаждений и полевых комплексов;

- ландшафт крупного склона расчленен на мелкие формы: микротальвеги и – ложбины западины и микроводоразделы, в виду гряд мелких бугров и холмов. Различия в увлажнении, прогревании, аккумуляции и транзите материала

служат основой для проектных предложений по развитию посадок растительности;

– сложившаяся за шестьдесят лет тропично-дорожная сеть служит пространственной основой для выявления главных и второстепенных осей и контуров паркостроительства на территории академлеса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков А.Г. Теория архитектурного пространства и архитектурное образование // Архитектура и строительство России. 2019. № 1(229). С. 80–93.
2. Потапова Е.В. Городские леса и парки г. Иркутска: привлекательность и состояние // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 8. С. 80–90.
3. Нехуженко Н.А. Основы ландшафтного проектирования и ландшафтной архитектуры. 2-е изд., исп. и доп. СПб.: Питер, 2011. 192 с.
4. Указ Президента Российской Федерации № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». 07.05.2018.
5. Национальный проект «Жилье и городская среда». 01.10. 2018 г. № 3.
6. Федеральный проект «Формирование комфортной городской среды». 21.12.2018.
7. Белов А.В., Лямкин В.Ф., Соколова Л.П. Картографическое изучение биоты. Иркутск: Облмашинформ. 2002. 160 с.
8. Попов П.Л., Китов А.Д., Черенев А.А., Сараев В.Г. Проблемы организации парковых зон в Байкальской природной территории (на примере дендропарка Иркутского Академгородка) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7 (1). С. 154–162.
9. Китов А.Л., Попов П.Л. Ландшафтно-территориальное планирование дендропарка академгородка ИНЦ СО РАН // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященная памяти чл.-корр. РАН А.Н. Антипова. 2019. С. 840–843.
10. Михеев В.С., Ряшин В.А. Ландшафты Юга Восточной Сибири. Карта М 1:1500000. Ин-т географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР. М: ГУГК, 1977.
11. Об охране озера Байкал: федер. закон от 01.05.1999 №94-ФЗ [Электронный ресурс] // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/2157025/>
12. Большаков А.Г. Геопластика в архитектуре и планировке ландшафта: учеб. пособие. Иркутск: Из-во ИрГТУ, 2000. 171 с.
13. Федеральный закон от 24.филос.1995 N 181-ФЗ (ред. от 28.12.2022) «О социальной защите инвалидов в Российской Федерации», Статья 15. Обеспечение беспрепятственного доступа инвалидов к объектам социальной, инженерной и транспортной инфраструктур.
14. Большаков А.Г. Восстановление нарушенных и деградированных территорий. История авторского метода геопластики // Architecture and Modern Information Technologies. 2015. №. 2 (31). С. 15–33.
15. Солнцев Н.А. О морфологии природного географического ландшафта // Вопросы географии. 1949. Т. 16. С. 61–86
16. Плынов Б.Б. Кора выветривания. Ч. 1. Процессы выветривания. Основные фазы и формы коры выветривания и их распределения. Л.: Изд-во АН СССР. 1934. 240 с.
17. Сочава В.Б. Проблемы физической географии и геоботаники. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука». 1986. 344 с.
18. Тикунова С.В. Метафизика культурного ландшафта: интерпретация и рефлексия. Белгород: НИУ «БелГУ». 2021. 155 с.
19. Большаков А.Г. Геопластика в архитектуре и планировке ландшафта. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук. 2000. 171 с.
20. Colvin B. Land and landscape: evolution, design and control // Land and landscape: evolution, design and control. 1970. 397 p.
21. Тикунова С.В., Рыбалкина П.В., Кинаш Л.А., Калинина Г.Н. Модусы творчества: философская рефлексия. Кишинев: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2021. 101 с.
22. Александер К., Исиава С., Силверстайн М. Язык шаблонов. Города. Здания. Строительство. М.: Изд-во Студия Артемия Лебедева. 2014. 1093 с.
23. Sheshukova A.A Pocket Park as a new typology of parks and public spaces in Irkutsk // Проект Байкал. 2016. No. 49. Pp. 109–112. DOI:10.7480/projectbaikal.49.1059
24. Грачева А.В. Озеленение и благоустройство территорий. Основы зеленого строительства. Москва: Форум. 2009. 350 с.

Информация об авторах

Большаков Андрей Геннадьевич, доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства. E-mail: andreybolsh@yandex.ru. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Тикунова Светлана Владимировна, кандидат философских наук, заведующий кафедрой дизайна архитектурной среды. E-mail: svetlanatikunova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.02.2023 г.

© Большаков А.Г., Тикунова С.В., 2023

¹*Bolshakov A.G.*, ^{2,*}*Tikunova S.V*

¹*Irkutsk National Research Technical University*

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

^{*}*E-mail: svetlanatikunova@yandex.ru*

PRINCIPLES OF URBAN ORGANIZATION OF THE PARK IN IRKUTSK

Abstract. The problem of preservation and transformation of the existing dendropark and natural forest in the conditions of urban development of the middle zone of the city is considered. The park is located in the scientific campus of the Siberian Branch of the Academy of Sciences in Irkutsk. The territory has the properties of a landscape park. At the same time, it is actively used as a walking area and for sports activities. There are risks of using the land for housing construction because the park is surrounded by intensive urban development. The research proves its recreational and architectural landscape value. The basis of the spatial structure is the particular combination of glades and forest plantations of the park. The system of footpaths, which took shape over 60 years, is a picturesque network that at first glance seems random. The study of the territory allows to identify patterns in the organization of the network. A highway dissects the forest area. A bicycle bridge is proposed in the project for crossing the road by pedestrians and cyclists. The design and architectural form of the bridge minimize the impact on the landscape of this structure. The bridge is designed as two spirals suspended from two high masts. Its length of 210 m, it covers an area with a radius of less than 20 meters. The microrelief on the hillside, represented by micro-watersheds and hollows, makes it possible to differentiate new plantings in the park according to the landscape properties due to this microrelief.

Keywords: spatial structure of the park; interposition of glades and plantings; path network; configuration of pedestrian activity; influence of microrelief on planting design; suspension spiral bridge, the principle of landscape conformity.

REFERENCES

1. Bolshakov A.G. Theory of architectural space and architectural education [Teoriya arhitekturnogo prostranstva i arhitekturnoe obrazovanie]. Architecture and construction of Russia. 2019. No. 1(229). Pp. 80–93 (rus).
2. Potapova E.V. Urban forests and parks of Irkutsk: attractiveness and condition [Gorodskie lesa i parki g. Irkutsk: privlekatel'nost' i sostoyanie]. Izvestiya Irkutsk State University. Series: Earth Sciences. 2014. Vol. 8. Pp. 80–90. (rus).
3. Nekhuzhenko N.A. Fundamentals of landscape design and landscape architecture [Osnovy landshaftnogo proektirovaniya i landshaftnoj arhitektury]. 2nd ed., Spanish and additional St. Petersburg: St. Petersburg, 2011. 192 p. (rus).
4. Decree of the President of the Russian Federation No. 204 "On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024". 07.05.2018.
5. National project "Housing and urban environment". 01.10. 2018 No. 3.
6. Federal project "Formation of a comfortable urban environment". 21.12.2018.
7. Belov A.V., Lyamkin V.F., Sokolova L.P. Cartographic study of biota [Kartograficheskoe

izucheniye bioty]. Irkutsk: Oblmashinform. 2002. 160 p. (rus).

8. Popov P.L., Kitov A.D., Cherenev A.A., Saraev V. G. Problems of the organization of park zones in the Baikal natural territory (on the example of the arboretum of the Irkutsk Akademgorodok) [Problemy organizatsii parkovykh zon v Bajkal'skoj prirodnoy territorii (na primere dendroparka Irkutskogo Akademgorodka)]. Geopolitics and ecogeodynamics of regions. 2021. Vol. 7 (1). Pp. 154–162. (rus).

9. Kitov A.L., Popov P.L. Landscape and territorial planning of the arboretum of Akademgorodok INTS SB RAS [Landshaftno-territorial'noe planirovaniye dendropark akademgorodka INC SO RAN]. Materials of the International scientific and Practical Conference dedicated to the memory of chl. - correspondent. RAS A. N. Antipova. 2019. Pp. 840–843. (rus).

10. Mikheev V.S., Ryashin V.A. Landscapes of the South of Eastern Siberia [Landshafty Yuga Vostochnoy Sibiri]. Map M 1:1500000. Institute of Geography of Siberia and the Far East of the USSR Academy of Sciences. Moscow: GUGK, 1977.

11. On the protection of Lake Baikal: feder. Law No. 94-FZ of 01.05.1999 [Electronic resource]. Garant. URL:<https://base.garant.ru/2157025/>

12. Bolshakov A.G. Geoplastics in architecture and landscape planning [Geoplastika v arhitekture i planirovke landshafta]: textbook. stipend. Irkutsk: Publishing House of IrSTU, 2000. 171 p. (rus)

13. Federal Law of 24.11.1995 N 181-FZ (ed. of 28.12.2022) "On Social protection of disabled persons in the Russian Federation", Article 15. Ensuring unhindered access of disabled people to social, engineering and transport infrastructure facilities. (rus)

14. Bolshakov A.G. Restoration of disturbed and degraded territories. The history of the author's method of geoplasty [Vosstanovlenie narushennyh i degradirovannyh territorij. Istoriya avtorskogo metoda geoplastiki]. Architecture and modern information technologies. 2015. No. 2 (31). Pp. 15–33. (rus)

15. Solntsev N.A. On the morphology of the natural geographical landscape [O morfologii prirodnogo geograficheskogo landshafta]. Questions of geography. 1949. Vol. 16. Pp. 61–86. (rus).

16. Polynov B.B. Weathering crust. Part 1. Weathering processes. The main phases and forms of the weathering crust and their distribution [Kora vyvetrivaniya. Ch. 1. Processy vyvetrivaniya. Osnovnye fazy i formy kory vyvetrivaniya i ih raspredeleniya]. L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1934. 240 p. (rus).

17. Sochava V.B. Problems of physical geography and geobotany [Problemy fizicheskoy geografii i geobotaniki]. Novosibirsk: Novosibirsk branch of the publishing house "Science". 1986. 344 p. (rus).

18. Tikunova S.V. Metaphysics of cultural landscape: interpretation and reflection [Metafizika kul'turnogo landshafta: interpretaciya i refleksiya]. Belgorod: NRU "BelSU". 2021. 155 p. (rus).

19. Bolshakov A.G. Geoplastics in architecture and landscape planning [Geoplastika v arhitekture i planirovke landshafta]. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2000. 171 p. (rus).

20. Colvin B. Earth and landscape: evolution, design and control //Earth and landscape: evolution, design and control. 1970. 397 p.

21. Tikunova S.V., Rybalkina P.V., Kinash L.A., Kalinina G.N. Modes of creativity: philosophical reflection [Modusy tvorchestva: filosofskaya refleksiya]. Chisinau: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2021. 101 p. (rus).

22. Alexander K., Ishikawa S., Silverstein M. template language. Cities. Building. construction [Yazyk shablonov. Goroda. Zdaniya. stroitel'stvo]. Moscow: Artemy Lebedev Studio Publishing House. 2014. 1093 p. (rus).

23. Sheshukova A. Pocket Park as a new typology of parks and public spaces of Irkutsk. Project Baikal. 2016. No. 49. Pp. 109–112. DOI:10.7480/projectbaikal.49.1059

24. Gracheva A.V. Landscaping and landscaping of territories. Fundamentals of green construction [Ozelenenie i blagoustrojstvo territorij. Osnovy zelenogo stroitel'stva]. Moscow: Forum. 2009. 350 p. (rus).

Information about the authors

Bolshakov Andrey Gennadyevich, Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: andreybolsh@yandex.ru. Irkutsk National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, st. Lermontov, 83.

Tikunova Svetlana Vladimirovna, Candidate of Philosophy, Head of the Department of Architectural Environment Design. E-mail: svetlanatikunova@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 10.02.2023

Для цитирования:

Большаков А.Г., Тикунова С.В. Принципы градостроительной организации парка в академгородке города Иркутска // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 87–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-87-96

For citation:

Bolshakov A.G., Tikunova S.V. Principles of urban organization of the park in Irkutsk. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 87–96. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-87-96

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-97-105

¹Семенцов С.В., ^{1,2}*Козырева Е.А.¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет^{1,2}Комитета по государственному контролю использованию и охране памятников истории и культуры Санкт-Петербурга

*E-mail: ket007@mail.ru

УСАДЬБЫ ВЫСШЕЙ ЗНАТИ НА ТЕРРИТОРИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И БЛИЖНИХ УЕЗДОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ ГУБЕРНИИ В 18 – НАЧАЛЕ 20 ВЕКА

Аннотация. Наследие усадеб России в целом и в том числе в Санкт-Петербургской губернии в настоящее время является почти уничтоженным, поэтому исследование темы, связанной с возможностью сохранения объектов усадебной архитектуры является особенно актуальной для реставрационного научного направления. Усадьбы высшей знати занимают особое место в истории архитектуры, но множество особенно уникальных усадебных комплексов остались только в воспоминаниях, а у большинства уцелевших сохранилась лишь небольшая часть построек в неудовлетворительном состоянии. Изучение территорий исторического Санкт-Петербурга и его ближайших окрестностей, охватывает сотни усадеб. Среди них можно выявить десятки очень крупных и исторически значимых. В работе выделен новый тип исторических усадебных объектов на территории Санкт-Петербурга и пригородных уездах Санкт-Петербургской губернии – «ближние усадьбы высшей знати» (усадьбы представителей первых 4 рангов в табели о рангах Российской Империи, отличающиеся особо крупными размерами территорий – до 200 га – и особо сложной структурой), которые несколькими поясами охватывали императорскую столицу и её окрестности. Сделан вывод, на основе проведенного анализа действующих предметов охраны, что они не учитывают главные особенности таких усадеб, так как чаще всего в них (предметах охраны) отсутствуют градостроительные и нематериальные составляющие предмета охраны.

Ключевые слова: усадьбы высшей знати, Санкт-Петербургская губерния, предметы охраны усадеб, градостроительные предметы охраны, нематериальные предметы охраны, Санкт-Петербургский уезд, Шлиссельбургский уезд, Петергофский уезд, Царскосельский уезд, объекты культурного наследия.

Введение. Изучение территорий исторического Санкт-Петербурга и его ближайших окрестностей (ближних уездов – Санкт-Петербургского, Шлиссельбургского, Петергофского, Царскосельского), охватывает сотни усадеб. Среди них можно выявить десятки очень крупных и исторически значимых. Такие крупнейшие усадьбы мы определяем, как «усадьбы высшей знати» или («ближние усадьбы высшей знати»). Это новое понятие, которое ранее не встречалось в исследовательских кругах. Оно определяет особый морфологический и социальный феномен в строительстве усадеб, сформированных несколькими поясами вокруг исторического Санкт-Петербурга, предназначенных для представителей высших слоев русского дворянства, проживавших в зонах дневной доступности вокруг российской столицы (с учетом скорости передвижения в XVIII - первой половине XIX века).

Выявленный тип «ближние усадьбы высшей знати» представлял собой яркое украшение императорской столицы и ее ближайших окрестностей. Они входят в общую типологическую группу «усадьбы высшей знати», расположенных вокруг Санкт-Петербурга, но имеют различия, предопределяющие параллельное рассмотрение

ближних усадеб (в границах четырех пригородных уездов – Санкт-Петербургского, Шлиссельбургского, Петергофского, Царскосельского) и дальних усадеб (в границах четырех дальних уездов Санкт-Петербургской губернии – Лужского, Гдовского, Ямбургского, Новолодожского, а также ближних к Санкт-Петербургу фрагментов Выборгской и Новгородской губерний). Схожие по характеристикам усадьбы есть и в других регионах Российской Федерации (Московская область, Крым, Смоленская область и другие.), однако больше всего их именно в исторической Санкт-Петербургской губернии, как части исторической Санкт-Петербургской агломерации. Аналогичные усадьбы характерны и для европейских стран.

В разное время изучением усадебной темы занимались архитекторы, историки, культурологи, искусствоведы такие как: И.В. Барсова [1], С.Е. Гусева [2, 3], Т.Е. Исаченко [4-7], Н.В. Мурашова [8-14], Л.П. Мыслина [10-14], О.В. Литвинцева [15], Е.П. Щукина [16], Т.Б. Дубяго [17], М.В. Нащокина [18-20], С.В. Семенцов [21], Е.Ю. Шуваева [21] и другие. Тема отдельного типа усадеб, таких как «ближние усадьбы высшей знати», нигде не раскрывалась.

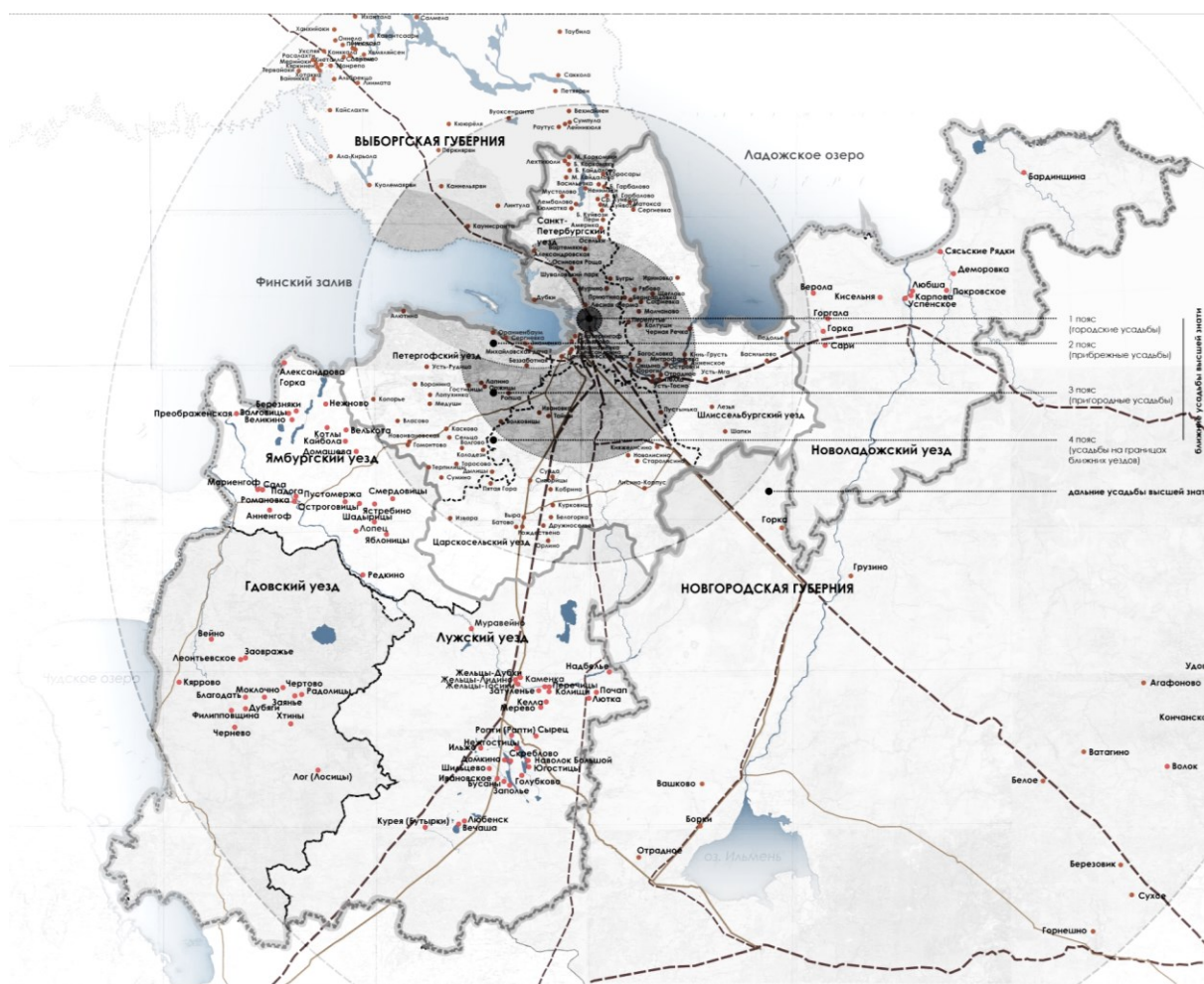


Рис. 1. Схема размещения поясов «ближних» и «дальних усадеб высшей знати»

Объект исследования – «ближние усадьбы высшей знати» в границах исторического Санкт-Петербурга и пригородных уездов исторической Санкт-Петербургской губернии, созданные до 1917 года.

Предмет исследования – особенности создания и развития ближних усадеб высшей знати на территории исторического Санкт-Петербурга и пригородных уездов исторической Санкт-Петербургской губернии, а также формирование предложений по сохранению и приспособлению этих усадеб для современного использования и охране объектов культурного наследия.

Цель исследования – выделение в отдельный тип объектов «ближние усадьбы высшей знати»; предложения по уточнению предметов охраны; определение основных принципов и направлений в их сохранении и современного использования с учетом их уникальной специфики, выявленных типологических особенностей и морфологических закономерностей формирования.

Границы исследования.

Территориальные – в административных границах исторического Санкт-Петербурга и

пригородных уездов исторической Санкт-Петербургской губернии.

Хронологические. Временные границы исследования охватывают период с 18 века и до публикации в 1917 году декретов о национализации недвижимости и земли. За это время ближние усадьбы высшей знати прошли полный цикл развития – от возникновения до исчезновения.

Материалы и методы. В качестве ключевых фактических способов исследования объектов можно выделить: изучение исторических документов, в том числе иконографических (планы, показывающие этапы развития населенного пункта и/или прилегающей территории, архитектурные проектные и фиксационные чертежи, живопись, графика, фотоматериалы и т. п.); свидетельства современников – упоминания в художественной и научной литературе периода создания объектов; проведение натурных архитектурно-художественных и визуальных обследований, обмеров, фотофиксации; широкий анализ градостроительной ситуации; визуально-ландшафтный анализ композиции; поиск объектов аналогов, относящихся к тому же автору и/или периоду создания и др.

Основная часть. В результате многолетнего исследования поставлена гипотеза о наличии среди многих сотен усадеб Санкт-Петербургской губернии очень крупных и исторически значимых усадеб, как на территории исторического Санкт-Петербурга, так и его ближайших окрестностей (ближних уездов – Санкт-Петербургского, Шлиссельбургского, Петергофского, Царскосельского). Такие крупнейшие усадьбы мы определяем, как «усадьбы высшей знати» или («ближние усадьбы высшей знати»)

В процессе исследования закономерностей и типологических особенностей формирования исторической усадебной застройки на территории ближних уездов Санкт-Петербургской губернии сформулированы следующие выводы и получены следующие результаты:

Выявлены «ближние усадьбы высшей знати», как особый тип усадебного строитель-

ства на территориях исторического Санкт-Петербурга и исторической Санкт-Петербургской губернии. Выделен из общего массива усадеб особый тип исторических усадебных объектов (владельцами которых были представители высших титулов Российской империи и четырех высших рангов по Табели о рангах), расположенные на территории самого исторического Санкт-Петербурга и ближних пригородных уездов Санкт-Петербургской губернии. Общее число таких ближних усадеб на этих территориях – 160. Сюда входят петербургские городские полицейские части и пригородные полицейские участки – 20 усадеб; ближние уезды Санкт-Петербургской губернии (Санкт-Петербургский уезд – 37 усадеб, Шлиссельбургский уезд – 40 усадеб, Петергофский уезд – 29 усадеб, Царскосельский уезд – 34 усадьбы) (рис. 2, 3).

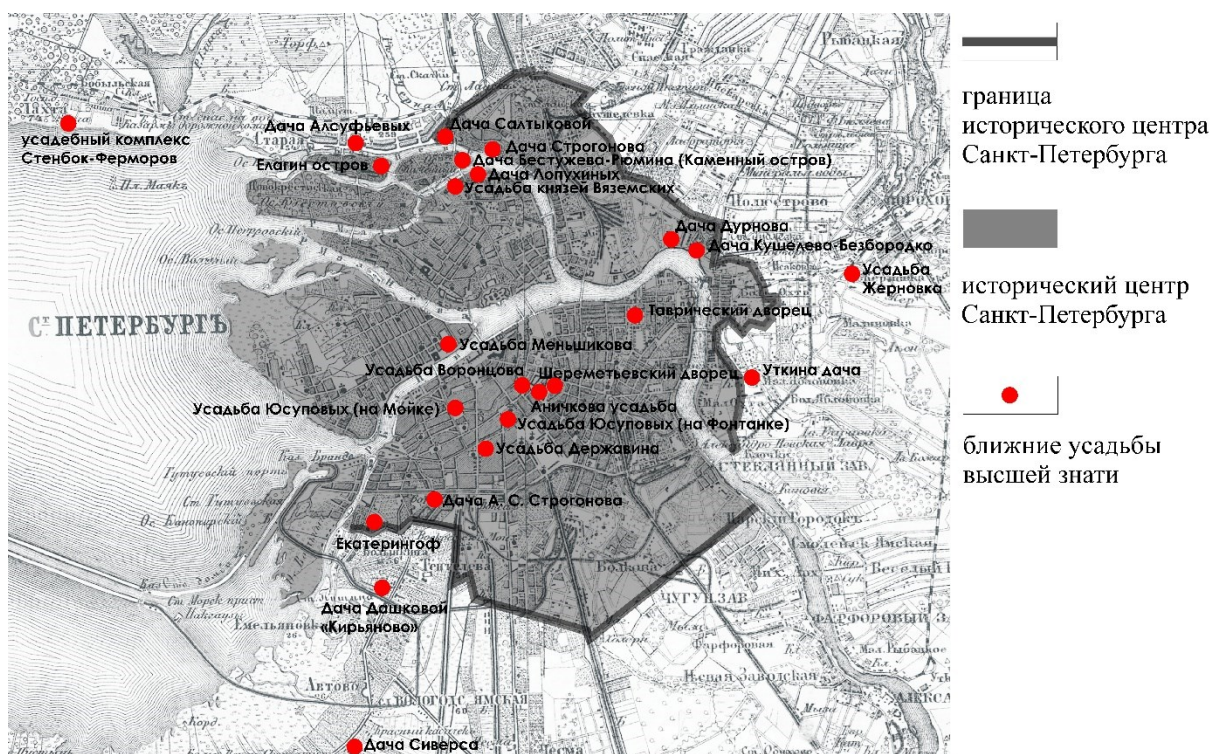


Рис. 2. Схема размещения «ближних усадеб высшей знати» на территориях, которые позднее вошли в состав центра Санкт-Петербурга

Изучены хронологические этапы создания и развития «усадьбы высшей знати». Выявлены следующие шесть этапов создания и развития усадеб высшей знати на территориях исторического Санкт-Петербурга и пригородных уездов: 1-й этап – 1703–1725 гг., 2-й – 1725–1761 гг., 3-й – 1762–1800 гг., 4-й – 1801–1836 гг., 5-й – 1837–1900 гг., 6-й – 1901–1916 гг. (рис. 4)

Определены характерные особенности, основные признаки, морфологические отличия «ближних усадеб». Дана классификация изучен-

ных объектов на основе историко-архитектурных, градостроительно-ландшафтных, типологических, стилевых, композиционных и морфологических признаков, в числе: создание усадеб силами лучших в России архитекторов и садовников в самых модных стилях; особенности размещения объектов в границах исторического Санкт-Петербурга и исторических пригородов; уникальная площадь каждой усадьбы от 5 га до 200 га; уникальность размещения на территории каждой усадьбы их парадных ядер, а также ши-

рокого разнообразия служебных и вспомогательных построек, включая многочисленные особые престижные и специально устроенные уникальные элементы усадебных ансамблей и комплексов («Горы Парнас», «Острова Любви», «Лабиринты», «Зеленые театры», «Павильоны Дружбы» и т. д.); топографические особенности

размещения ядра усадьбы относительно главных элементов природных и рукотворных ландшафтов; характер сезонного использования усадеб владельцами; категория современной охраны и система охраны, степень сохранности в настоящее время усадьбы в целом, ее ландшафтов и объектов.

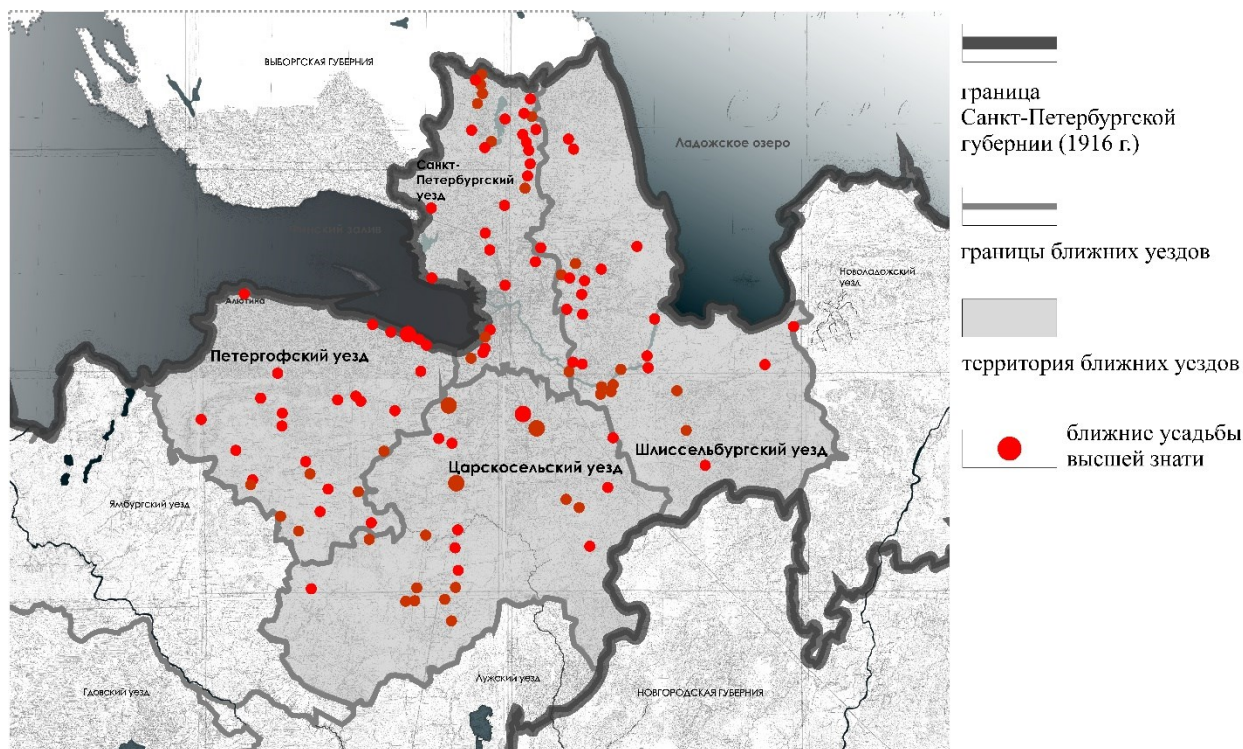


Рис. 3. Схема размещения «ближних усадеб высшей знати», на территории ближних уездов Санкт-Петербургской губернии

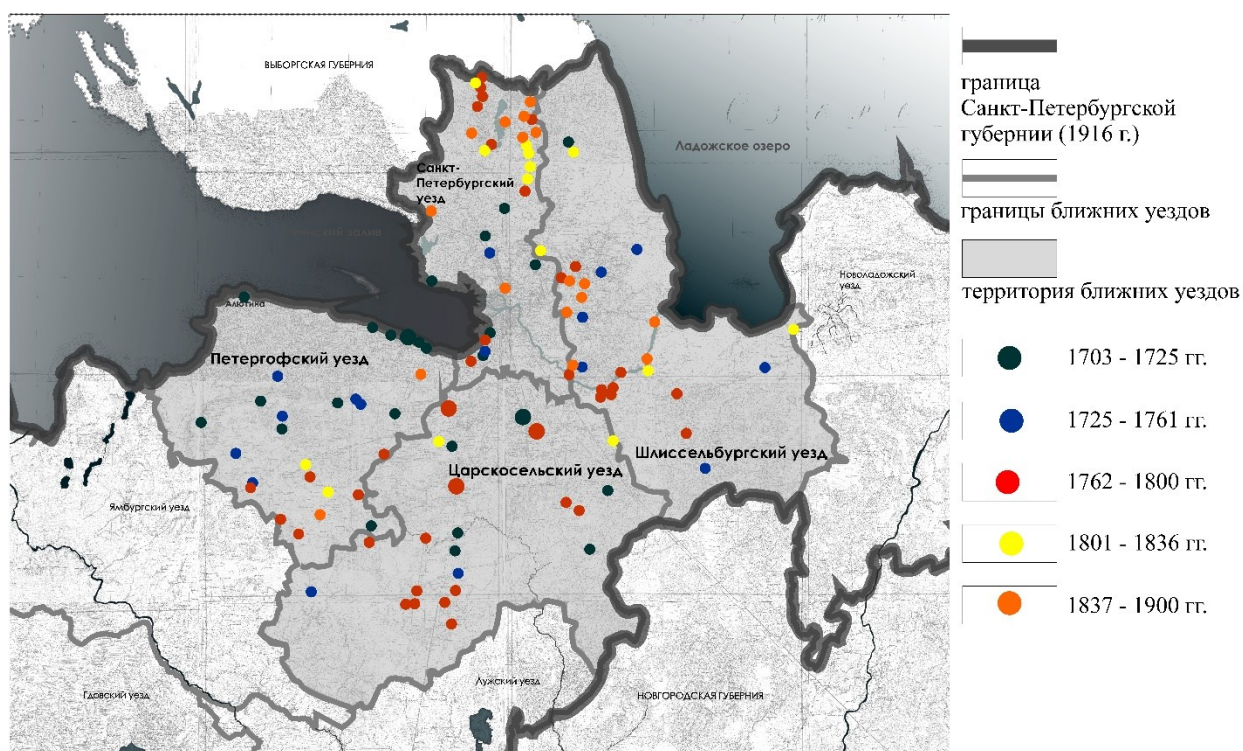


Рис. 4. Схема поэтапного формирования «ближних усадеб высшей знати»

Сформулированы территориальные и ландшафтно-географические закономерности размещения и структурной организации ближних усадеб высшей знати. Выявлены общие закономерности организации и планировочные характеристики усадебных ансамблей и комплексов высшей знати на территориях ближних уездов, основанные на ландшафтно-географических особенностях размещения данного типа усадеб и их объектов относительно водных и сухопутных

коммуникаций, а также на ландшафтно-географических характеристиках размещения усадеб и их компонентов. Как следствие, можно выделить следующие типы усадеб, расположенных соответственно: 1) на берегах крупных водных объектов (крупных рек и озер); 2) небольших рек и ручьях; 3) равнинах без естественных водных объектов; 4) Ижорском плато; 5) берегу Финского залива в Предглинтовом районе (рис. 5).

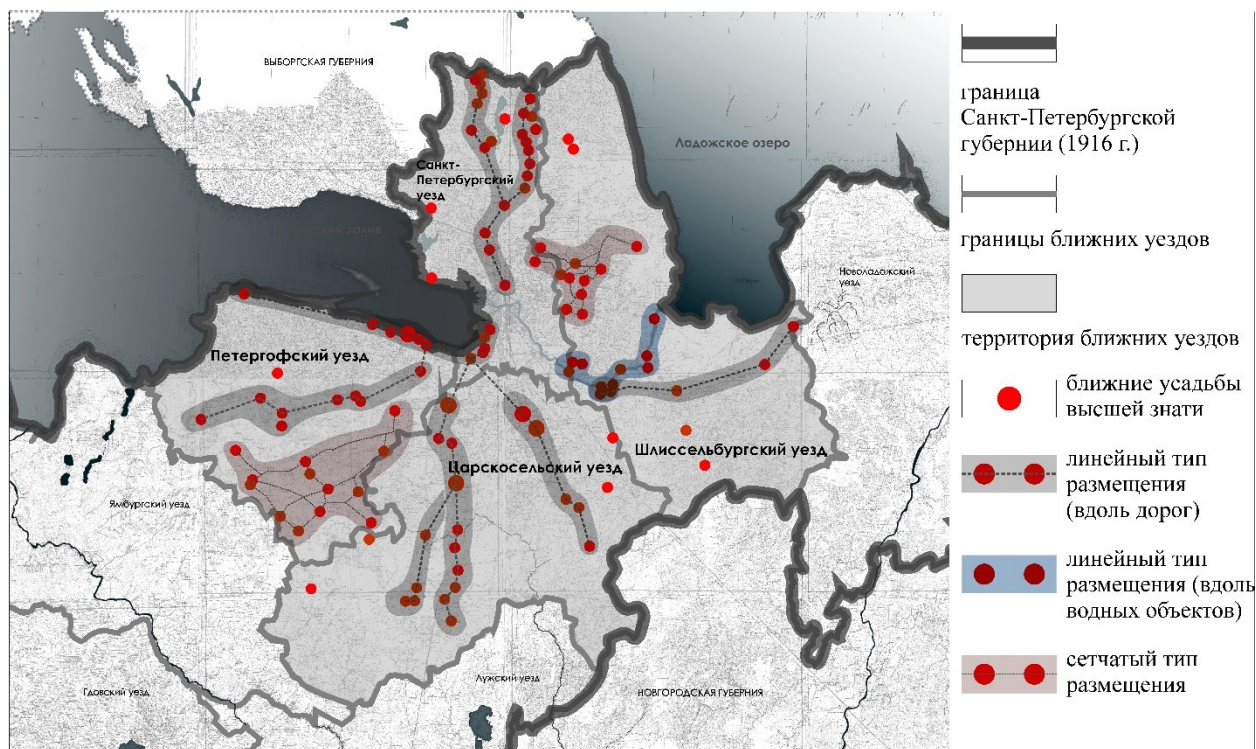


Рис. 5. Схема размещения «ближних усадеб высшей знати» относительно водных и сухопутных коммуникаций

Отмечены особенности размещения ближних усадеб в структуре исторической Санкт-петербургской агломерации. В том числе - особенности размещения ближних усадеб высшей знати в структуре исторической Санкт-Петербургской агломерации, отражающие сезонные принципы расселения высших слоев исторического петербургского общества, а также влияние этих усадеб на формирование и развитие локальных территориальных структур (включая города Придворного ведомства, поселки, деревни, посады и производственные городки) в исторической Санкт-Петербургской агломерации в целом.

Показаны хронологический и территориальный векторы развития усадебной застройки высшей знати в ближней зоне исторического Санкт-Петербурга вплоть до 1917 г. Отмечены хронологический и территориальный вектор развития усадебной застройки высшей знати в ближней зоне исторического Санкт-Петербурга

вплоть до 1917 г.: «усадеб» сформировали особую «кольцевую» (в непосредственной близости от столицы и загородных императорских ансамблей) и «сетчатую» (чуть далее, в тех же в пригородных уездах, но вне непосредственного влияния пригородных императорских ансамблей) типы размещения. «Ближние усадьбы высшей знати» были не только материальными памятниками, но и включали особый культурно-социальный фактор, значительно повлиявший на культурную жизнь столицы.

Предложены рекомендации по уточнению системы сохранения и определения предметов охраны «ближних усадеб высшей знати», включая уточнение системы охраны важнейших композиционных и стилистических особенностей усадеб в их исторической среде (с непременным уточнением состава предметов охраны и принципов системы охранного зонирования).

Проведенные углубленные исследования системы усадеб на территориях исторической

Санкт-Петербургской губернии позволили выявить особый тип усадеб: «усадьбы высшей знати» (усадьбы членов Императорской фамилии и представителей высших 4 рангов в Табели о рангах). В данной статье рассмотрена часть таких усадеб – «ближние усадьбы высшей знати» – на территориях исторического центра Санкт-Петербурга (появившихся изначально на внегородских территориях и позднее вошедших в ткань города в результате его неоднократных расширений) и в границах ближних к нему пригородных уездов (Санкт-Петербургского, Шлиссельбургского, Петергофского, Царскосельского). Рассмотрены закономерности их хронологического формирования, уникальные типологические и морфологические особенности, а также существующие проблемы их сохранения.

Анализ действующих предметов охраны на подавляющем большинстве объектов культурного наследия (ОКН) позволяет говорить о том, что чаще всего в системе предметов охраны ОКН присутствуют традиционные «объектные» предметы охраны, но отсутствуют градостроительные и нематериальные. В процессе исследования предложено дополнять предметы охраны усадеб описанием градостроительных и нематериальных составляющих. Нематериальные предметы охраны (при их наличии) позволяют сохранить «душу» усадеб – то есть ее характерные черты, что были запечатлены в лучших произведениях современников (как например в усадьбах Пушкина или Вяземских). Градостроительные предметы охраны позволяют сохранить доминирующую роль ближних усадеб высшей знати в окружающей застройке, а также их уникальность.

Выводы.

1. Выделен из общего массива усадеб особый тип исторических усадебных объектов – «ближние усадьбы высшей знати», расположенные на территории самого исторического Санкт-Петербурга и ближних пригородных уездов Санкт-Петербургской губернии. К высшей знати относились: члены Императорской фамилии по Манифесту о наследовании, 1797 г., представители высших 4 рангов по Табели о рангах (1722 г.). Общее число ближних усадеб на территориях исторического Санкт-Петербурга (современный исторический центр города) и его исторических уездов – 160. Сюда входят: Санкт-Петербургские городские полицейские части, пригородные полицейские участки (20 усадеб), Санкт-Петербургский уезд (37 усадеб), Шлиссельбургский уезд (40 усадеб), Петергофский уезд (29 усадеб), Царскосельский уезд (34 усадеб).

2. В границах изучаемой территории выяв-

лено 160 ближних усадеб высшей знати, в исследовании Шуваевой Е.Ю. выявлено 148 «дальних усадеб высшей знати», что суммарно дает по территории всей Санкт-Петербургской агломерации 308 усадеб высшей знати.

3. Выявлены общие закономерности организации и планировочные особенности усадебных ансамблей и комплексов высшей знати на территориях ближних уездов, основанные на ландшафтно-географических характеристиках размещения данного типа усадеб и их объектов относительно водных и сухопутных коммуникаций.

Как следствие, можно выделить следующие типы усадеб, расположенных соответственно: 1) на берегах крупных водных объектов (крупных рек и озер); 2) небольших реках и ручьях; 3) равнинах без естественных водных объектов; 4) Ижорском плато; 5) берегу Финского залива в Предглинтовом районе.

4. Отмечены особенности размещения ближних усадеб высшей знати в структуре исторической Санкт-Петербургской агломерации, отражающие сезонные принципы расселения высших слоев исторического Санкт-Петербургского общества («ближние усадьбы высшей знати» рассмотрены как единая система сезонного расселения); показано влияние этих усадеб на формирование и развитие локальных территориальных структур и исторической Санкт-Петербургской агломерации в целом.

5. Показаны хронологический и территориальный векторы развития усадебной застройки высшей знати в ближней зоне исторического Санкт-Петербурга вплоть до 1917 г. «Ближние усадьбы высшей знати» сформировали особые «кольцевую» (непосредственно рядом со столицей и загородных императорских ансамблей) и «сетчатую» (чуть далее, в тех же в пригородных уездах, но вне влияния пригородных императорских ансамблей) типы размещения. В целом, система усадеб высшей знати в пригородных уездах имела центрическую систему, центром которой был Санкт-Петербург. «Ближние усадьбы высшей знати» были не только материальными памятниками, но и включали особый культурно-социальный фактор, отражавшийся в системе письменных источников и значительно повлиявший на культурную жизнь исторического Санкт-Петербурга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барсова И.В. Усадебные парки Ленинградской области и принципы их использования: дис. ... канд. архитектуры: Т. 1. Л., 1971. 221 с.

2. Гусева С.Е. Аллеи в усадьбах Санкт-Петербургской губернии // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 7. С. 49–50.
3. Гусева С.Е. Садово-парковый комплекс сельских дворянских усадеб Санкт-Петербургской губернии (типологический аспект) : дис. ... канд. архитектуры: 18.00.01. СПб., 2008. 172 с.
4. Исаченко Т.Е. Взаимосвязь природно-культурных комплексов дворянских усадеб и ландшафтов: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23: Т. 1. СПб., 2003. 199 с.
5. Исаченко Т.Е. Дворянские усадьбы в ландшафте Ижорского плато // Русская усадьба: сборник ОИРУ. 2001. Вып. 7 (23). С. 41–55.
6. Исаченко Т.Е. Дворянские усадьбы и ландшафт: три века взаимодействия // Вестник СПбГУ. СПб., 2003. Вып. 4 (31). С. 88–101.
7. Исаченко Т.Е. Природно-культурные комплексы старинных усадеб в ландшафтах Санкт-Петербургского региона // Известия Русского географического общества. 2003. Т. 135, вып. 2. С. 1–14.
8. Мурашова Н.В. Усадьба Белогорка // Адреса Петербурга. 2004. № 15/27. С. 94–99.
9. Мурашова Н.В. Сто дворянских усадеб Санкт-Петербургской губернии: исторический справочник. СПб.: Выбор, 2005. 399 с.
10. Мурашова Н.В., Мыслина Л.П. Дворянские усадьбы Санкт-Петербургской губернии. Лужский район. СПб.: Русско-Балтийский информационный центр Блиц, 2001. 352 с.
11. Мурашова Н.В., Мыслина Л.П. Дворянские усадьбы Санкт-Петербургской губернии. Кингисеппский район. СПб.: Информационный центр «Выбор», 2003. 280 с.
12. Мурашова Н.В., Мыслина Л.П. Дворянские усадьбы Санкт-Петербургской губернии. Всеволожский район. СПб.: Алаборг, 2008. 320 с.
13. Мурашова Н.В., Мыслина Л.П. Дворянские усадьбы Санкт-Петербургской губернии. Южное Приладожье. Кировский и Волховский районы. СПб.: Алаборг, 2009. 368 с.
14. Мурашова Н.В., Мыслина Л.П. Дворянские усадьбы Санкт-Петербургской губернии. Волосовский район. СПб.: Аврора, 2020. 624 с.
15. Литвинцева О.В. Формирование сельских дворянских усадеб Новгородской губернии конца XVIII – XIX вв. : дис. ... канд. архитектуры: 18.00.01: Т. 1. Санкт-Петербург, 2006. 130 с.
16. Щукина Е.П. Подмосковные усадебные сады и парки конца XVIII века. М., Институт природного и культурного наследия имени Д. С. Лихачева, 2007. 384 с.
17. Дубяго Т.Б. Русские регулярные сады и парки. Л.: Стройиздат, 1963. 344 с.
18. Нащокина М.В. Актуальные проблемы изучения русской усадьбы // Русская усадьба: сборник ОИРУ. 2008. Вып. 13 – 14 (29 – 30). С. 7–16.
19. Нащокина, М.В. Ботанические сады и дендрарии русских усадеб XVIII – начала XX века // Русская усадьба: сборник ОИРУ. 2017. Вып. 22 (38). С. 310–331.
20. Нащокина М.В. Влияние местных культур и строительных традиций на архитектуру крымских усадеб конца XVIII – начала XX века // Художественная культура. 2020. № 1 (32). С. 143–158.
21. Sementsov S.V., Kozyreva E.A., Shuvaeva E.Yu. Estates of the highest nobility of the St. Petersburg province as a special spatial structure of the historical St. Petersburg agglomeration // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 775. 012073.

Информация об авторах

Семенцов Сергей Владимирович, доктор архитектуры, профессор кафедры архитектурного и градостроительного наследия. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Козырева Екатерина Андреевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурного и градостроительного наследия. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. E-mail: ket007@mail.ru. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4. Начальник Управления зон охраны объектов культурного наследия Комитета по государственному контролю использованию и охране памятников истории и культуры Санкт-Петербурга. Россия, 191023, Санкт-Петербург, пл. Ломоносова д. 1.

Поступила 01.11.2022 г.

© Семенцов С.В., Козырева Е.А., 2023

¹*Sementsov S.V., ^{1,2,*}Kozyreva E.A.*¹*St. Petersburg State University of Architecture and Engineering*²*Committee for State preservation of historical and cultural Monuments Petersburg***E-mail: ket007mail.ru*

ESTATES OF THE HIGHEST NOBILITY IN THE TERRITORIES OF ST. PETERSBURG AND NEIGHBORING COUNTIES OF ST. PETERSBURG PROVINCE IN THE 18TH - EARLY 20TH CENTURY

Abstract. *The heritage of the estates of Russia as a whole, including in the St. Petersburg province, is currently almost destroyed, therefore, the study of the topic related to the possibility of preserving the objects of manor architecture is especially relevant for the restoration scientific direction. The estates of the highest nobility occupy a special place in the history of architecture, but many especially unique manor complexes have remained only in memories, and most of the survivors have preserved only a small part of the buildings in poor condition. The study of the territories of historical St. Petersburg and its immediate surroundings covers hundreds of estates. Among them, dozens of very large and historically significant ones can be identified. The paper highlights a new type of historical estate objects on the territory of St. Petersburg and suburban counties of St. Petersburg province - "near estates of the highest nobility" (estates of representatives of the first 4 ranks in the table of ranks of the Russian Empire, characterized by particularly large territories - up to 200 hectares – and a particularly complex structure), which covered several belts the imperial capital and its surroundings. It is concluded, based on the analysis of the existing objects of protection, that they do not take into account the main features of such estates, since most often there are no urban planning and intangible components of the object of protection in them (objects of protection).*

Keywords: *estates of the highest nobility, St. Petersburg province, objects of protection of estates, town-planning objects of protection, intangible objects of protection, St. Petersburg county, Shlisselburg county, Peterhof county, Tsarskoye Selo county, objects of cultural heritage.*

REFERENCES

1. Barsova I.V. Manor parks of the Leningrad region and the principles of their use [Usadebny'e parki Leningradskoj oblasti i principy' ih ispol'zovaniya]: dis. ... cand. architecture: Vol. 1. L., 1971. 221 p. (rus)
2. Guseva S.E. Alleys in the manors of the St. Petersburg province [Allei v usad'bah Sankt-Peterburgskoj gubernii]. Industrial and civil construction. 2007. No. 7. Pp. 49–50. (rus)
3. Guseva S.E. Garden and park complex of rural noble estates of the St. Petersburg province (typological aspect) [Sadovo-parkovy'j kompleks sel'skih dvoryanskih usadeb Sankt-Peterburgskoj gubernii (tipologicheskij aspekt)] dis. ... cand. architecture: 18.00.01: Vol. 1. St. Petersburg, 2008. 172 p. (rus)
4. Isachenko T.E. The relationship of natural and cultural complexes of noble estates and landscapes [Vzaimosvyaz' prirodno-kul'turny'h kompleksov dvoryanskih usadeb i landshaftov]: dis. ... Candidate of Geographical Sciences: 25.00.23: Vol. 1. St. Petersburg, 2003. 199 p. (rus)
5. Isachenko T.E. Noble estates in the landscape of the Izhora plateau [Dvoryanskie usad'by' v landshafte Izhorskogo plato]. Russian manor: collection of OIRU. 2001. Issue 7 (23). Pp. 41–55. (rus)
6. Isachenko T.E. Noble estates and landscape: three centuries of interaction [Dvoryanskie usad'by' i landshaft: tri veka vzaimodejstviya]. Bulletin of St. Petersburg State University. 2003. Issue 4 (31). Pp. 88–101. (rus)
7. Isachenko T.E. Natural and cultural complexes of ancient estates in the landscapes of the St. Petersburg region [Prirodno-kul'turny'e komplekсы starinny'h usadeb v landshaftah Sankt Peterburgskogo regiona]. News of the Russian Geographical Society. 2003. Vol. 135. Issue 2. Pp. 1–14. (rus)
8. Murashova N.V. Belogorka Manor [Usad'ba Belogorka]. Addresses of St. Petersburg. 2004. No. 15/27. Pp. 94–99. (rus)
9. Murashova N.V. One hundred noble estates of St. Petersburg province: historical reference [Sto dvoryanskih usadeb Sankt-Peterburgskoj gubernii: istoricheskij spravochnik]. St. Petersburg: Choice, 2005. 399 p. (rus)
10. Murashova N.V., Myslina L.P. Noble estates of the St. Petersburg province. Luga district [Dvoryanskie usad'by' Sankt-Peterburgskoj gubernii. Luzhskij rajon]. St. Petersburg: Russian-Baltic Information Center Blitz, 2001. 352 p. (rus)
11. Murashova N.V., Myslina L.P. Noble estates of the St. Petersburg province. Kingisepp district [Dvoryanskie usad'by' Sankt-Peterburgskoj gubernii. Kingiseppskij rajon]. St. Petersburg: Information Center "Choice", 2003. 280 p. (rus)
12. Murashova N.V., Myslina L.P. Noble estates of the St. Petersburg province. Vsevolzhsky district [Dvoryanskie usad'by' Sankt-Peterburgskoj gubernii. Vsevolzhskij rajon]. St. Petersburg: Alaborg, 2008. 320 p. (rus)

13. Murashova N.V., Myslina L.P. Noble estates of the St. Petersburg province. Southern Ladoga region. Kirovsky and Volkhovsky districts [Dvoryanskie usad'by' Sankt-Peterburgskoj gubernii. Yuzhnoe Priladozh'e. Kirovskij i Volkhovskij rajony']. St. Petersburg: Alaborg, 2009. 368 p. (rus)

14. Murashova N.V., Myslina L.P. Noble estates of the St. Petersburg province. Volosovsky district [Dvoryanskie usad'by' Sankt-Peterburgskoj gubernii. Volosovskij rajon]. St. Petersburg: Aurora, 2020. 624 p. (rus)

15. Litvintseva O.V. Formation of rural noble estates of the Novgorod province of the late XVIII – XIX centuries. [Formirovanie sel'skih dvoryanskih usadeb Novgorodskoj gubernii konca XVIII–XIX vv.] dis. ... cand. architecture: 18.00.01: Vol. 1. St. Petersburg, 2006. 130 p. (rus)

16. Shchukina E.P. Suburban manor gardens and parks of the late XVIII century [Podmoskovny'e usadebny'e sady' i parki konca XVIII veka]. M., Institute of Natural and Cultural Heritage named after D. S. Likhachev, 2007. 384 p. (rus)

17. Dubyago T.B. Russian regular gardens and parks [Russkie reguljarny'e sady' i parki]. L.: Stroyizdat, 1963. 344 p.

18. Nashchokina, M.V. Actual problems of the study of the Russian estate [Aktual'ny'e problemy' izucheniya russkoj usad'by']. Russian estate: collection of OIRU. 2008. Vol. 13–14 (29–30). Pp. 7–16. (rus)

19. Nashchokina M.V. Botanical gardens and arboreturns of Russian estates of the XVIII – early XX century [Botanicheskie sady' i dendrarii russkih usadeb XVIII – nachala XX veka]. Russian manor: a collection of OIRU. 2017. Issue 22 (38). Pp. 310–331. (rus)

20. Nashchokina M.V. The influence of local cultures and building traditions on the architecture of Crimean estates of the late XVIII – early XX century [Vliyanie mestny'h kul'tur i stroitel'ny'h tradicij na arhitekturu kry'mskih usadeb konca XVIII – nachala XX veka]. Art Culture. 2020. No. 1 (32). Pp. 143–158. (rus)

21. Sementsov S.V., Kozyreva E.A., Shuvaeva E.Yu. Estates of the highest nobility of the St. Petersburg province as a special spatial structure of the historical St. Petersburg agglomeration. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 775. 012073. (rus)

Information about the authors

Sementsov, Sergey V. Doctor of Architecture, Professor of Architecture heritage. St. Petersburg State University of Architecture and Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4.

Kozyreva, Ekaterina A. Graduate student of Architecture heritage. St. Petersburg State University of Architecture and Engineering. E-mail: ket007mail.ru. Russia, 190005, St. Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4. Head of the department for the Protection of Cultural Heritage Sites of the Committee for State preservation of historical and cultural Monuments Petersburg. Russia, 191023, St. Petersburg, Lomonosov square. 1.

Received 01.11.2022

Для цитирования:

Семенцов С.В., Козырева Е.А. Усадьбы высшей знати на территориях Санкт-Петербурга и ближних уездов Санкт-Петербургской губернии в 18 – начале 20 века // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-97-105

For citation:

Sementsov S.V., Kozyreva E.A. Estates of the highest nobility in the territories of St. Petersburg and neighboring counties of St. Petersburg province in the 18th - early 20th century. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-97-105

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-106-118

Шабанов Д.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: shabanov_dv@internet.ru

ЭФФЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВЫХ СИЛ МЕЖДУ РОБОТАМИ ПРИ ГРУППОВОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГРУЗА

Аннотация. В задаче коллективного перемещения груза колесными роботами имеется кинематическая избыточность приводов, что позволяет распределять тяговые силы без изменения траектории и скорости движения системы. Благодаря этому возможно задать дополнительные критерии качества движения, которые должна стремиться выполнить система управления при распределении тяговых сил. Также, эффективное распределение позволит роботам перемещаться с большей скоростью без возникновения проскальзывания колес, чем при классических подходах к управлению.

Роботы и груз, объединенные в одну систему механически и информационно, образуют транспортную ячейку переменной конфигурации (ТЯПК). Рассматриваются следующие критерии качества движения: отсутствие проскальзывания колес, поддержание заданной скорости, отсутствие мягких ударов, минимизация работы в генераторном режиме, соблюдение желаемых конечных зарядов аккумуляторов роботов после прохождения маршрута. Предложенные алгоритмы эффективного распределения тяговых сил основаны на поиске локального минимума и на принципе обучения Хебба.

Проведены тесты в среде Simulink с использованием динамической математической модели ТЯПК. В рассматриваемом частном случае новые алгоритмы распределения позволили увеличить максимальную допустимую скорость вхождения в поворот на 27 % в сравнении с классическими подходами к управлению. При движении с меньшей скоростью новые алгоритмы распределения показали положительные результаты по дополнительным критериям качества движения.

Изложенный материал также может быть применен к многоколесным роботам с поворачиваемыми приводными колесами.

Ключевые слова: колесный робот, мобильный робот, поперечные силы колес, распределение моментов, тяговые силы, многоколесный транспорт.

Введение. В мобильной робототехнике существуют задачи перемещения груза с использованием кинематически избыточного количества приводов. К ним относятся задачи управления многоколесными транспортными системами [1, 2], задачи коллективного и мультиагентного перемещения груза [3, 4]. При разработке систем управления принимается некое правило распределения моментов между приводами, позволяющее избавиться от избыточности и свести задачу к соблюдению заданных траектории и скорости движения. Чаще всего либо применяется равное распределение моментов (например, в работе [5]), либо используется кинематический подход, при котором каждый из приводов стремится поддерживать необходимую скорость вращения колеса, используя ПИД-регулятор, как это делается для двухколесных роботов [6]. Таким же образом определяются начальные значения моментов в работе [7] для последующей корректировки регулятором с нечеткой логикой.

Однако, существуют алгоритмы распределения нагрузки между агентами или приводами, позволяющие использовать избыточность приводов для повышения качества транспортировки. При коллективном перемещении груза роботами

без жесткой связи сила может распределяться так, чтобы груз гарантированно не съехал с них [8]. Существует схожая задача распределения моментов между приводами электромобилей. Распределение моментов может быть реализовано исходя из энергоэффективности [9, 10], пропорционально вертикальной нагрузке [11], или исходя из комбинации критериев (энергоэффективность, опасность проскальзывания колес, положение педали газа и радиус поворота) [12]. Существующие алгоритмы, используемые в электромобилях, неприменимы к колесным роботам, так имеются различия в кинематике, скорости движения, маневренности и инерционных характеристиках.

В работе рассматривается транспортная ячейка переменной конфигурации (ТЯПК) [13]. Она состоит из платформы с грузом и группы роботов, выполняющих функцию тягачей (рис. 1, а). Роботы могут поворачиваться вокруг оси стыковочного узла, чтобы занять правильное угловое положение, и создавать тяговые силы для передвижения платформы. Также, стыковочный узел позволяет передавать вертикальную нагрузку на робота для лучшего сцепления приводных колес с полом. С точки зрения динамики

такая система аналогична многоколесному роботу с поворотными приводными колесами (рис. 1, б). Количество и расположение роботов (ко-

лес) может быть произвольным и зависит от параметров груза и характера траектории движения.

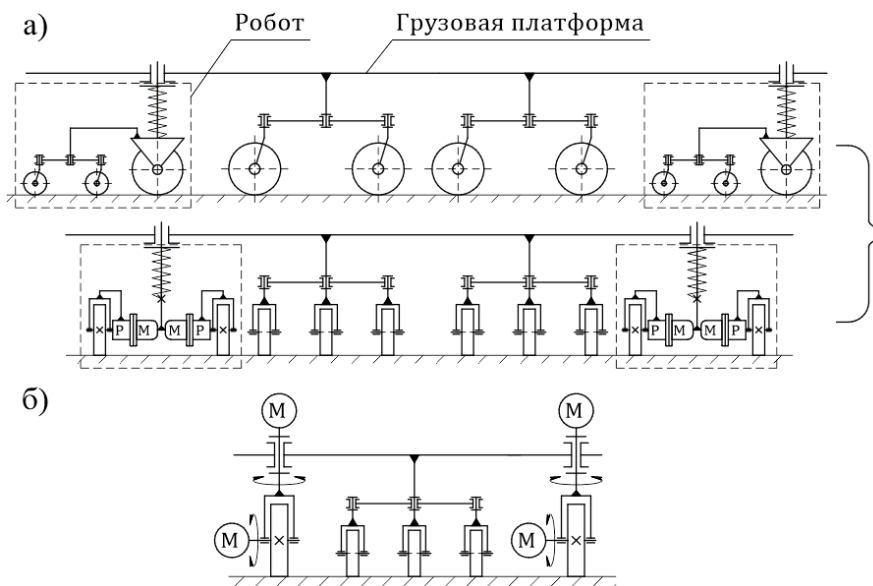


Рис. 1. Транспортная ячейка переменной конфигурации: а – полное представление; б – упрощенное представление

Система управления ТЯПК (рис. 2) построена таким образом, что направление движения задается исключительно поворотом роботов на необходимый угол α_i , а соблюдение скорости движения обеспечивается регулятором кинетической энергии. Величина T_{ICR}^* , вычисляемая блоком контроля скорости, является желаемым суммарным моментом, который должны создать

приводы относительно мгновенного центра скоростей (МЦС) ячейки. Момент T_{ICR}^* может быть получен различными комбинациями линейных сил F_i , создаваемых роботами:

$$\sum r_{ICRi} F_i = T_{ICR}^*, \quad (1)$$

где r_{ICRi} – расстояние от МЦС до i -го робота.

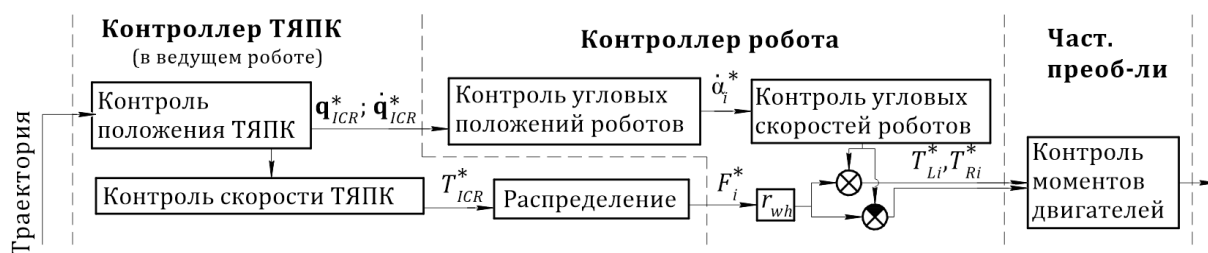


Рис. 2. Структура системы управления ТЯПК

Таким образом, имеется одно уравнение (1) и n неизвестных сил F_i (n – количество роботов), что позволяет задаться некоторыми дополнительными уравнениями, способствующими повышению эффективности работы системы.

Целью данной работы является создание алгоритма распределения тяговых сил между роботами, позволяющего увеличить скорость транспортировки груза без проскальзывания колес, и учитывающего дополнительные критерии качества транспортировки груза.

Критерии качества движения. Для оценки эффективности алгоритмов распределения используются следующие критерии в порядке приоритета:

- 1) отсутствие проскальзывания колес;
- 2) отсутствие мягких ударов;
- 3) соблюдение заданной законом движения скорости движения;
- 4) минимизация работы роботов в генераторном режиме;
- 5) стремление уровней заряда аккумуляторов роботов к желаемым.

Поскольку критерии 1-4 также актуальны и для многоколесных роботов со схожей кинематикой (например, [14-16]), ТЯПК будет рассматриваться как эквивалентный робот (рис. 1, б). Каждый тяговый робот, входящий в состав ТЯПК, условно заменяется колесом, способным поворачиваться на заданный угол, и создавать заданную

тяговую силу F_i (рис. 3). Критерий, связанный с желаемым уровнем заряда роботов, актуален только для ТЯПК, поэтому в рамках него нет

условной замены тяговых роботов на приводные колеса.

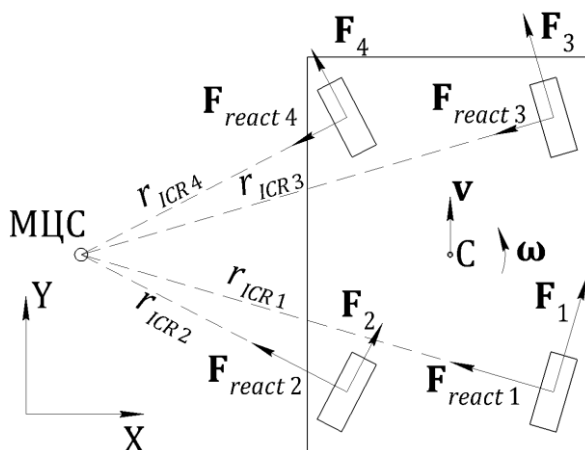


Рис. 3. Векторы сил и скоростей

Принимается, что максимальная сила трения скольжения между колесом и полом не превышает максимальную тяговую силу F_i , которую может создать привод. Следовательно, ограничение момента привода не учитывается.

Отсутствие проскальзывания колес определяется выражением

$$F_{fri} < (F_{zi} + m_r g) \mu = F_{max}, \quad (2)$$

где F_{fri} – сила трения скольжения между колесом номер i и полом; F_{zi} – сила прижатия колеса к полу узлом сцепки; m_r – собственная масса привода (робота); μ – коэффициент трения скольжения покоя между колесом и полом; F_{max} – максимальная допустимая величина силы трения скольжения.

В рамках работы рассматривается частный случай, в котором величина F_{zi} одинакова для всех колес, что позволяет оперировать только значением F_{max} . Численной характеристикой качества работы алгоритма является величина Q_{fr} , определяющаяся как максимальная величина линейной скорости робота v , при которой не возникает проскальзывания колес.

Мягким ударом считаем превышение производной силы некоего порогового значения J_{max} :

$$\frac{dF_i(t)}{dt} \leq J_{max}. \quad (3)$$

Для оценки качества движения по этому критерию используется величина Q_{hit} :

$$Q_{hit} = \sum \int_0^{t_1} J_{hi}(t) dt; \quad (4)$$

$$J_{hi}(t) = \begin{cases} 0; & \left| \frac{dF_i(t)}{dt} \right| \leq J_{max} \\ \left| \frac{dF_i(t)}{dt} \right| - J_{max}; & \left| \frac{dF_i(t)}{dt} \right| > J_{max} \end{cases}, \quad (5)$$

где t_1 – время перемещения груза; J_{hi} – превышение $dF_i(t)/dt$ сверх желаемого предельного уровня.

Для соблюдения заданной скорости транспортировки достаточно выполнение равенства (1). Величина T_{ICR} задается контуром регулирования кинетической энергии, что подробно описано в работе [13]. Для этого критерия не используется численный показатель. В процессе определения величины Q_{fr} проверяется, что отклонение скорости движения от заданной не должно превышать 5 %.

Критерий минимизации работы в генераторном режиме необходим для снижения энергозатрат системы, не способной рекуперировать энергию. Для численного сравнения определяется количество энергии, рассеянной в тепло при торможении:

$$Q_{gen} = \sum \int_0^{t_1} r_{ICRi}(t) F_{negi}(t) |\omega(t)| dt; \quad (6)$$

$$F_{negi}(t) = \begin{cases} 0; & F_i(t) > 0 \\ -F_i(t); & F_i(t) \leq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где F_{negi} – линейная сила, создаваемая приводным колесом в направлении, противоположном направлению движения; ω – скорость вращения робота вокруг МЦС. Скалярное значение силы F_i считается положительным, если сила направлена в сторону движения робота.

Контроль уровней заряда аккумуляторов роботов уделяется мало внимания в научной литературе. В случае непредвиденного неравномерного использования роботов может появиться необходимость в их экстренной замене [17], что требует большего времени на транспортировку и использование дополнительных роботов. Этого можно избежать, если централизованная логистическая система управления будет определять желаемые конечные уровни заряда, а системы управления роботов будут стремиться выполнять это. При этом централизованная логистическая система должна оценивать риск разряда аккумулятора робота [18], на основе чего принимать решение, стоит ли его использовать в следующем перемещении груза.

Необходимость распределения сил, исходя из уровней заряда аккумуляторов, демонстрируется следующим примером (рис. 4). Необходимо выполнить перемещение грузов 1 и 2 с помощью шести и трех роботов соответственно. В первом

случае (рис. 4, б) роботы имеют равный, “средний” уровень заряда аккумуляторов после перемещения груза 1. Поскольку этого недостаточно для перемещения груза 2, они отправляются на зарядную станцию, а транспортировка груза 2 выполняется другими роботами.

В другом случае (рис. 4, в) роботы разрядились неравномерно в процессе транспортировки груза 1. Три робота имеют минимальный необходимый заряд аккумуляторов и будут отправлены на зарядную станцию. Другие три робота имеют заряд аккумуляторов достаточный для транспортировки груза 2, что позволяет использовать оставшиеся на зарядной станции роботы для выполнения других задач. Приведенный пример является лишь частным случаем, демонстрирующим влияние уровней заряда аккумуляторов на логику транспортной системы. Возможность планировать потребление энергии аккумулятора позволит максимально эффективно использовать транспортную систему.

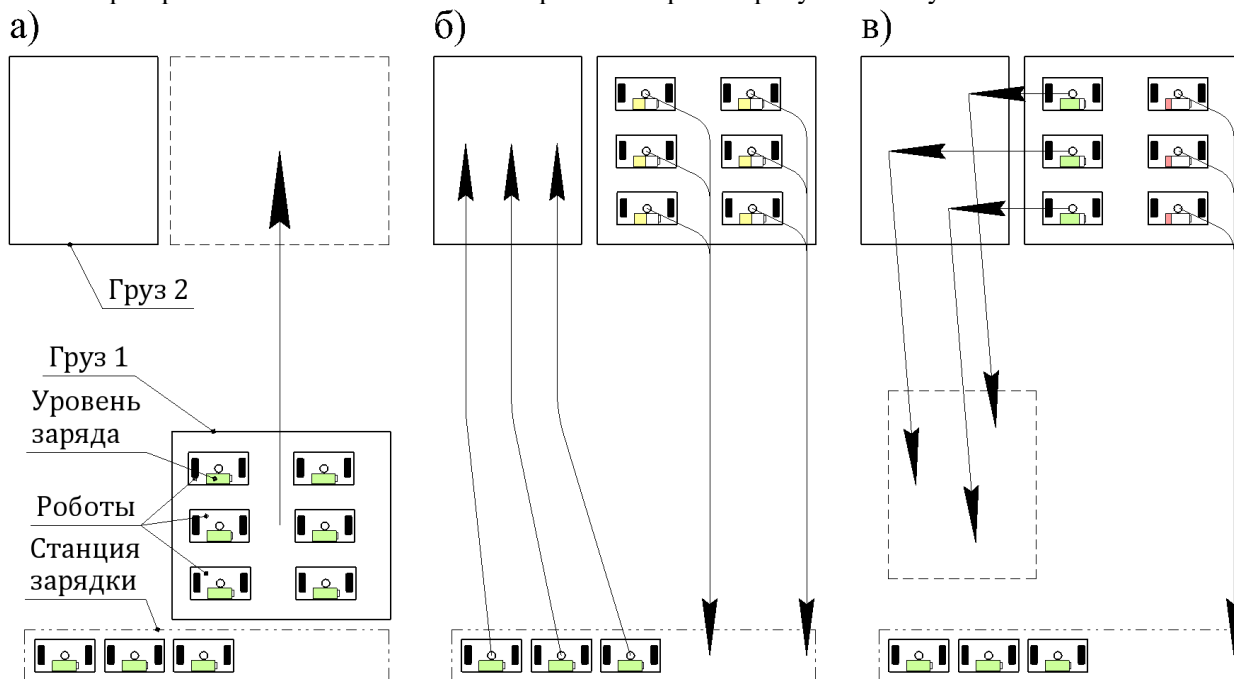


Рис. 4. Задача перемещения двух грузов:

- а) начальное состояние; б) последствия равномерного использования зарядов аккумуляторов роботов;
в) эффективность неравномерного использования зарядов аккумуляторов роботов

Качество движения по этому критерию оценивается разностью итоговых фактических и желаемых уровней заряда аккумуляторов, приведенных к количеству механической энергии:

$$Q_{en} = \sum |E_i - E_i^*|, \quad (8)$$

где E_i – фактический уровень заряда аккумулятора робота в конце маршрута, приведенный к Дж; E_i^* – желаемый уровень заряда в конце маршрута, приведенный к Дж.

Зависимость силы трения от тяговых сил.

Для соблюдения неравенства (2) необходимо учитывать взаимосвязь силы трения F_{fri} , действующей на каждое из колес и сил F_j , создаваемых каждым приводом. При отсутствии проскальзывания вектор $\mathbf{F}_{fri}$ можно разложить на поперечную составляющую $\mathbf{F}_{react i}$ и на продольную, равную и сонаправленную $\mathbf{F}_i$ (рис. 3):

$$\mathbf{F}_{fri} = \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{react i}. \quad (9)$$

Желаемое изменение момента относительно МЦС также зададим через обратную связь:

$$\frac{dT_{ICR}(t)}{dt} = k_{psp} (T_{ICR}^*(t) - T_{ICR}(t)). \quad (18)$$

Вычисление значения $T_{ICR}^*(t)$ описано в [13]. Критерий поддержания заданной скорости задает одно уравнение в общем виде.

Минимизация работы в генераторном режиме заключается в поддержании величины $F_i(t)$ в положительной области. Реализуется это аналогично с контролем отсутствия проскальзывания

колес – с помощью виртуального реле и П-регулятора (рис. 6). Пороги срабатывания выбраны равными $0,05F_{max}$ и $0,02F_{max}$.

$$A_i(t)J_i^*(t) = C_i(t) = k_{pgen} (0,05F_{max} - F_i(t)). \quad (19)$$

Аналогично критерию отсутствия проскальзывания колес, данный критерий задает n уравнений в общем виде, некоторые из которых должны быть проигнорированы при отключенном виртуальном реле. При этом A_i равно единице, остальные коэффициенты A равны нулю.

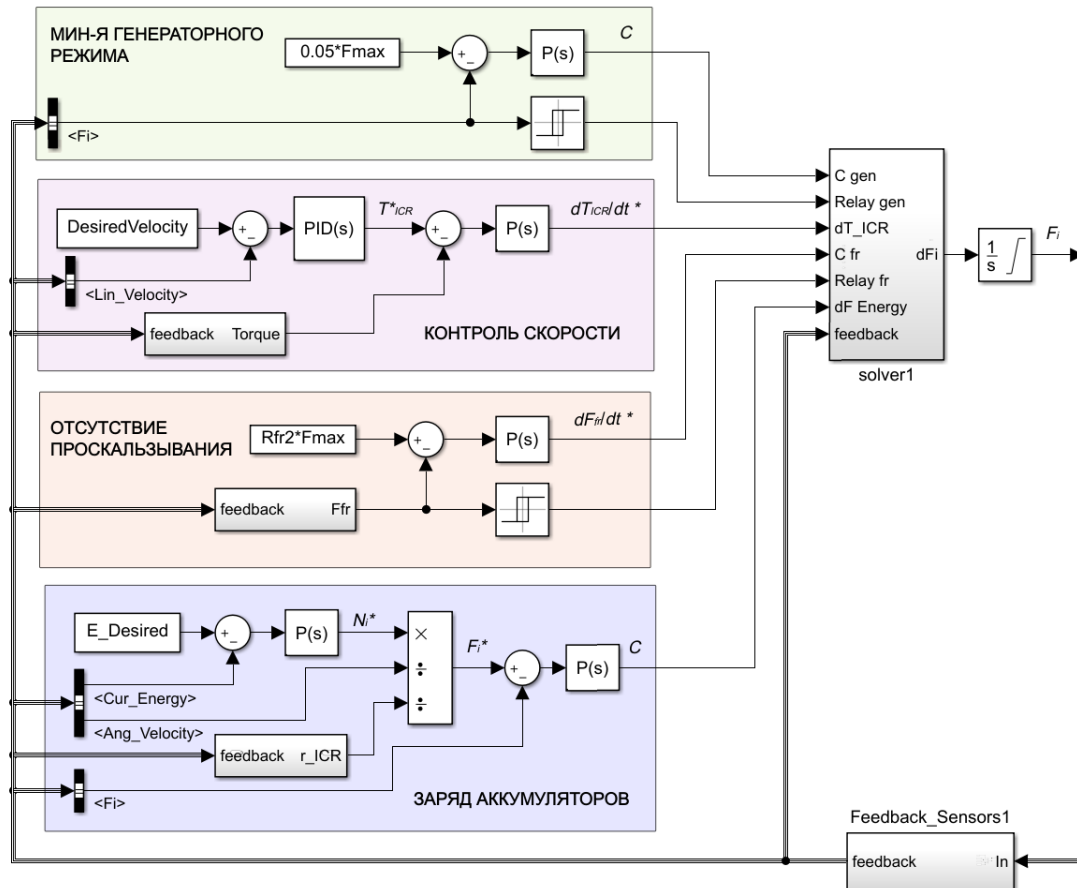


Рис. 6. Обратная связь и виртуальные реле

Стремление системы к желаемым уровням зарядов аккумуляторов роботов задается двух-контурной системой. Первый контур задает желаемую линейную силу F_i исходя из расхождения

желаемого и фактического уровней заряда роботов. Второй контур задает желаемое значение $J_i(t)$ исходя из разницы между желаемой величиной линейной силы и фактической (рис.7):

$$A_i(t)J_i^*(t) = C_i(t) = k_{pen2} \left(\frac{1}{r_{ICRi}(t)\omega(t)} k_{pen1} (E_i^* - E_i(t)) - F_i(t) \right). \quad (20)$$

Данный критерий добавляет n уравнений в общем виде. Поскольку он не зависит от линейных сил, создаваемых другими роботами, A_j равно нулю для всех j , кроме равного i .

Контроль мягких ударов зависит от способа определения конечного значения J_i , что подробнее описано в следующем разделе.

Распределение сил. В предыдущем разделе получены $3n+1$ уравнений, соответствующие обозначенным критериям, и содержащие n неизвестных. Алгоритмы распределения сил между приводами (роботами) должны задавать значения J_i^* , учитывая приоритетность уравнений и состояния виртуальных реле.

Первый алгоритм распределения заключается в поиске локального минимума заданной функции стоимости CF :

$$CF(\mathbf{J}^*) = \sum_{k=1}^{3n+1} Rel_k p_k (C_k - \mathbf{A}_k \mathbf{J}^*)^2 + \sum_{i=1}^n J_i^{*2}, \quad (21)$$

где k – номер уравнения из предыдущего раздела; $\mathbf{A}_k$ и C_k – соответствующие величины из уравнения номер k , записанного в виде (14); Rel_k – значение активности виртуального реле (0 или 1), соответствующего уравнению k ; p_k – коэффициент приоритетности критерия.

Второе слагаемое выражения (21) нужно для ограничения мягких ударов.

Второй алгоритм распределения основан на принципе обучения Хебба [20]. Простейшая форма обучения Хебба для нейронных сетей имеет вид:

$$\Delta \omega_{kj}(n) = \eta \cdot y_k(n) \cdot x_j(n), \quad (22)$$

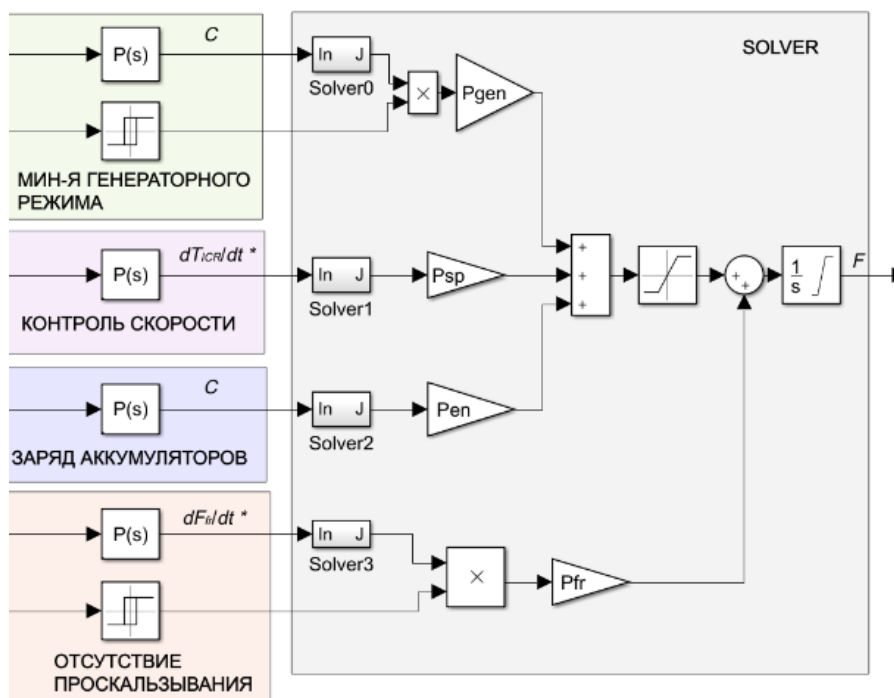


Рис. 7. Упрощенная структура системы распределения сил на основе принципа Хебба

Таким образом, чем больший вклад в достижение значения C_k может привнести изменение силы F_i , тем больше она должна быть изменена. Коэффициенты A'_k нормированы таким образом, чтобы сумма их модулей равнялась 1.

$$J_i^* = Rel_k p_k C_k A'_{ki} = Rel_k p_k C_k \frac{A_{ki}}{\sum_{j=1}^n |A_{kj}|}, \quad (23)$$

$$\mathbf{J}^* = \frac{Rel_k p_k C_k}{\sum_{j=1}^n |A_{kj}|} \mathbf{A}_k. \quad (24)$$

где $\Delta \omega_{kj}$ – изменение синаптического веса; η – коэффициент скорости обучения; x_j и y_k – предсинаптический и постсинаптический сигналы, соответственно; n – номер шага итерационного процесса обучения.

Проведем аналогию между задачей распределения сил между приводами (роботами) и задачей обучения нейронной сети:

- аналогом синаптического веса является величина линейной силы F_i , создаваемой приводом;
- аналогом изменения синаптического веса является искомая величина J_i^* ;
- аналогом предсинаптического (входного) сигнала является нормированный коэффициент A'_{ki} ;
- аналогом постсинаптического (выходного) сигнала является значение C_k .

Для каждого уравнения существует свой набор $\mathbf{J}^*$. Результирующее, общее значение $\mathbf{J}^*$ задается как их сумма:

$$\mathbf{J}^* = \sum_{k=1}^{3n+1} \frac{Rel_k p_k C_k}{\sum_{j=1}^n |A_{kj}|} \mathbf{A}_k. \quad (25)$$

Упрощенная структура системы распределения сил показана на рисунке 7. Стоит обратить внимание на то, что, несмотря на использование принципа обучения Хебба, в предложенном алгоритме не используется машинное обучение как таковое. Для минимизации мягких ударов ограничивается сумма слагаемых, не связанных с ограничениями проскальзывания.

Проверка алгоритмов в среде Simulink.

Системы распределения сил тестируются при движении четырехколесного робота (четыреагентной ТЯПК) по траектории, изображенной на рисунке 8, а. Траектория задана кривой

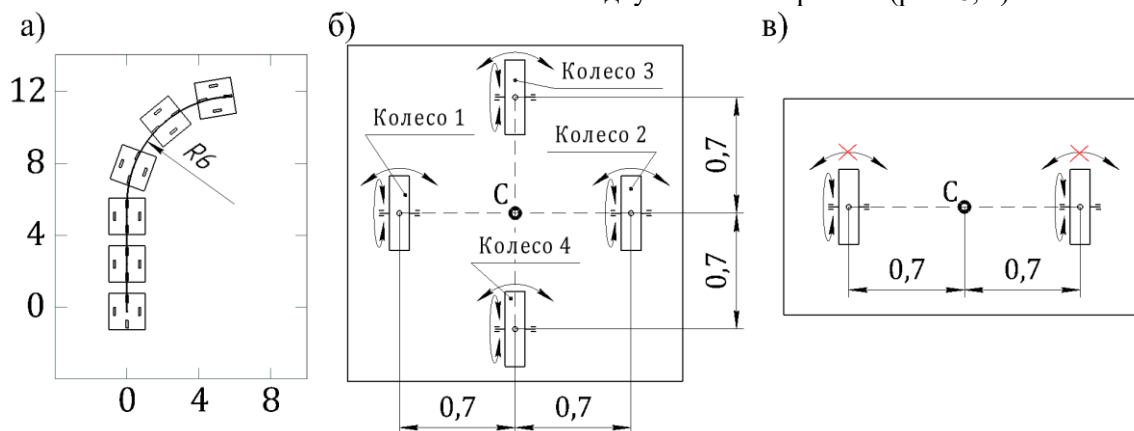


Рис. 8. Тестирование в Simulink: а) траектория движения; б) расположение приводных колес (роботов) относительно центра масс; в) расположение колес двухколесного робота

Параметры системы:

- масса груза и роботов: $m=1000$ кг;
- момент инерции груза и роботов относительно центра масс $I=1000$ кг·м²;
- приведенная сила сопротивления качению $F_{roll}=200$ Н;
- максимальная сила трения скольжения на колесе (роботе) $F_{max}=122$ Н;
- максимальная сила трения скольжения на колесе двухколесного робота $F_{max}=250$ Н;
- начальный уровень заряда каждого из роботов 2000 Дж;
- желаемые конечные уровни заряда роботов $[1700, 1000, 1700, 700]^T$ Дж.

С помощью симуляции оцениваются четыре алгоритма распределения сил: кинематический

Безье четвертого порядка во избежание резких изменений скоростей и ускорений.

Расположение колес (роботов) относительно центра масс груза показано на рисунке 8, б. Для сравнения также рассматривается движение двухколесного робота (рис. 8, в).

подход, равное распределение (26), распределение с поиском локального минимума и распределение, основанное на принципе Хебба (далее для краткости “распределение по Хеббу”). Кинематический подход подразумевает использование ПИД-регулятора для поддержания необходимой линейной скорости v_i движения каждого колеса (робота) (27). Кинематический подход рассматривается как для четырехколесной системы, так и для двухколесного робота. Поиск локального минимума реализован функцией `fminsearch`.

$$F_i = T_{ICR}^* / \sum r_{ICRj}, \quad (26)$$

$$F_i = k_p (v_i^* - v_i) + k_d \frac{d(v_i^* - v_i)}{dt} + k_i \int_0^t (v_i^* - v_i) dt. \quad (27)$$

Таблица 1

Показатели эффективности алгоритмов распределения сил

Алгоритм распределения	Максимальная скорость Q_{fr} , м/с	Мягкие удары Q_{hit} , Н	Работа в генераторном режиме Q_{gen} , Дж	Отклонение конечного уровня заряда Q_{en} , Дж
Кинематический подход (двухколесный робот)	1,22	393 (222)	14 (0)	-
Кинематический подход	1,1	0(0)	0 (0)	1908 (1908)
Равный момент	1,08	0(0)	0 (0)	1805 (1805)
Поиск лок. минимума	1,31	98(35)	0,5 (0,5)	1222 (650)
Распределение по Хеббу	1,4	264(12)	20,5 (0)	148 (86)

В таблице 1 представлены показатели эффективности, вычисленные согласно выражениям (4), (6) и (8). Главным показателем является максимальная скорость движения без возникно-

вения проскальзывания. Для объективного сравнения по показателям Q_{hit} , Q_{en} и Q_{gen} в скобках записаны результаты симуляций при движении со скоростью 1 м/с.

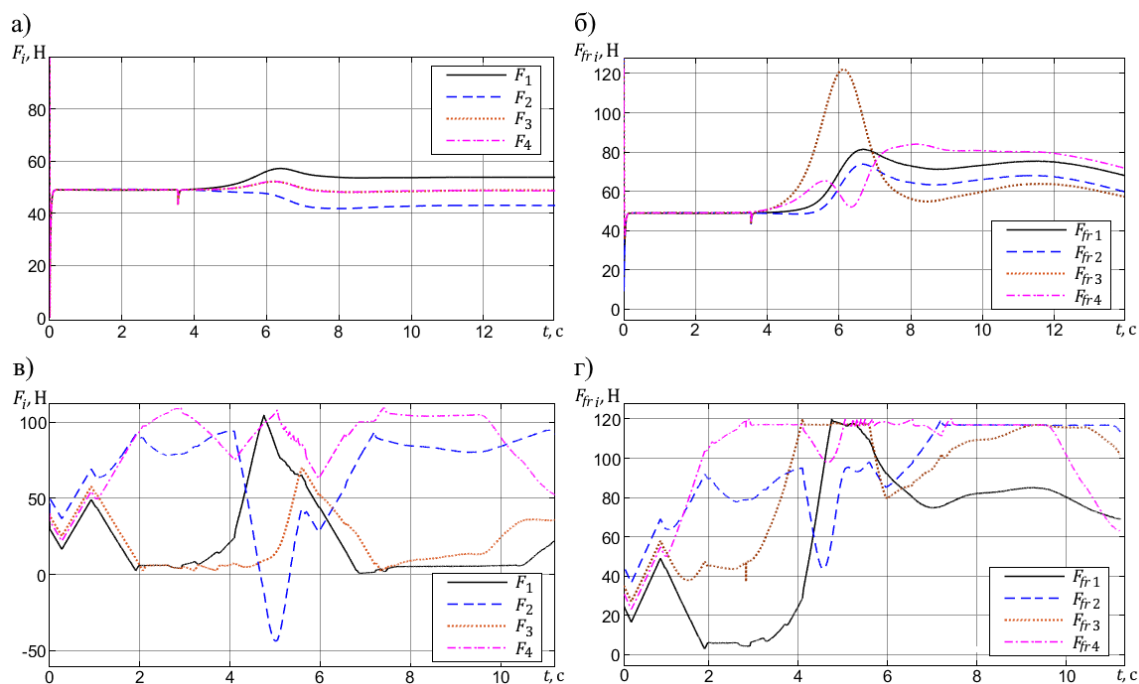


Рис. 9. Симуляция движения на максимальной скорости:

а – тяговые силы приводов (роботов) при кинематическом распределении; б – силы трения при кинематическом распределении; в – тяговые силы приводов (роботов) при распределении по Хейббу; г – силы трения при распределении по Хейббу

Как видно из результатов, новые алгоритмы распределения позволяют увеличить скорость движения системы и учитывают желаемые конечные уровни заряда аккумуляторов. Для примера сравним кинематическое распределение и распределение по Хейббу. Скорости движения – 1,1 м/с и 1,4 м/с соответственно. По графикам, соответствующим кинематическому распределению (рис. 9, а, рис. 9, б), видно, что сила трения колеса (робота) № 3 близка к критичной в момент вхождения в поворот. Силы трения других колес имеют достаточно большой запас, что демонстрирует низкую эффективность распределения,

так как для увеличения скорости движения достаточно увеличить момент другого колеса. В то же время, по графикам с распределением по Хейббу (рис. 9, в, рис. 9, г) видно, что силы трения всех четырех колес близки к граничному значению. Это свидетельствует об эффективном использовании возможностей системы. Предложенные алгоритмы распределения вызывают незначительные мягкие удары и работу в генераторном режиме, что вызвано стремлением системы выполнить требования других критериев.

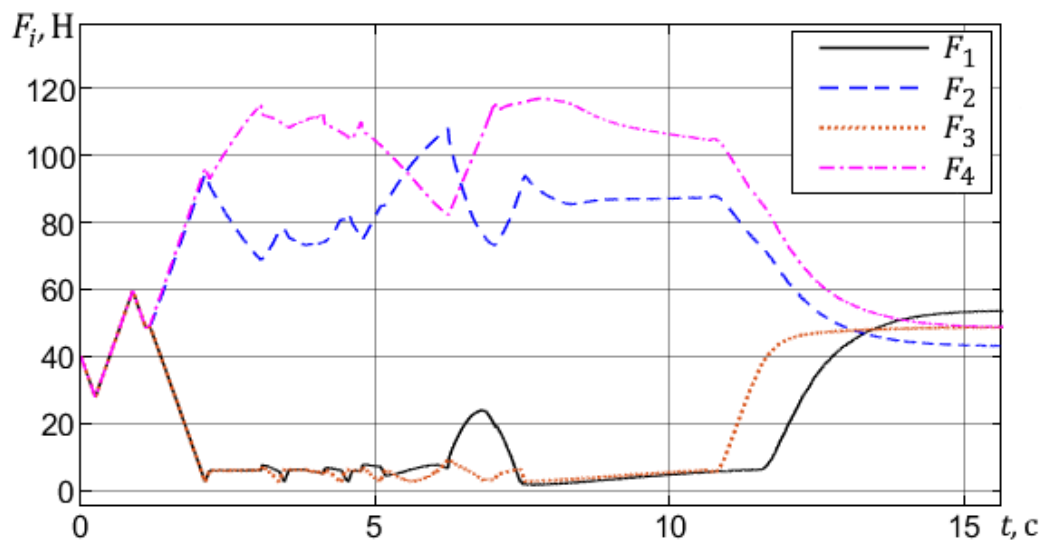


Рис. 10. Распределение тяговых сил приводов (роботов) по Хейббу при движении со скоростью 1 м/с

При движении со скоростью 1 м/с наилучшие результаты также показало распределение по Хеббу. По графику (рис. 10) видно, как учитываются менее приоритетные критерии, чем отсутствие проскальзывания колес: Робот 1 и робот 3 практически не используются в движении, так как уровень заряда их аккумуляторов изначально близок к желаемому; скачки тяговых сил этих роботов в зоне, близкой к нулю, вызваны срабатываем реле для минимизации работы в генераторном режиме; резкие изменения сил F_i отсутствуют для исключения мягких ударов.

Также стоит отметить, что при задании требуемой скорости в диапазоне от 1,4 до 1,5 м/с распределение по Хеббу снизит текущую скорость движения до 1,4 м/с на опасном участке во избежание проскальзывания колес, что значительно повышает безопасность использования системы в случае неверно заданной скорости движения.

Заключение. В результате работы определены критерии эффективности использования роботов в системе ТЯПК: отсутствие проскальзывания колес, отсутствие мягких ударов, поддержание заданной скорости движения, минимизация работы в генераторном режиме, стремление к желаемому конечному уровню заряда аккумуляторов. Предложены два новых алгоритма распределения тяговых сил между роботами и проведено сравнение их эффективности с классическими алгоритмами для частного случая.

По всем критериям алгоритм, основанный на принципе Хебба, показал лучшие результаты: максимальная допустимая скорость выше на 27 %, чем при кинематическом распределении, практически достигнуто желаемое значение уровня заряда аккумуляторов, отсутствует работа в генераторном режиме. Также, этот алгоритм способен снижать скорость движения системы на опасных участках траектории.

Однако, для полноценного сравнения необходим глубокий математический анализ и большое количество экспериментов, так как эффективность распределения зависит от используемых при настройке коэффициентов, траектории движения и параметров системы.

Предложенные алгоритмы также возможно использовать для построения систем управления многоколесных роботов и другого оборудования с кинематически избыточным количеством приводов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации программы «Приоритет 2030», стратегический проект «Человекоцентричные технологии и решения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dziomin U., Kabysh A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot // IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867-873. DOI:10.1109/IDAACS.2013.6663051.
2. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot // International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp. 130-140. DOI:10.1007/978-3-642-27272-1_12.
3. Tallamraju R., Verma P., Sripada V., Agrawal S., Karlapalem K. Energy Conscious Over-actuated Multi-Agent Payload Transport Robot: Simulations and Preliminary Physical Validation // 2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). 2019. Pp. 1-7. DOI:10.1109/RO-MAN46459.2019.8956442.
4. Abbaspour A., Alipour K., Jafari H.Z., Moosavian S.A.A. Optimal formation and control of cooperative wheeled mobile robots // Comptes Rendus Mécanique. 2015. Vol. 343. No. 5-6. Pp. 307-321. DOI:10.1016/j.crme.2015.04.003.
5. Danapalasingam K.A. Electric vehicle traction control for optimal energy consumption // International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. 2013. Vol. 5. No. 3. Pp. 233-252. DOI:10.1504/IJEHV.2013.057607.
6. Shijin C.S., Udayakumar K. Speed control of wheeled mobile robots using PID with dynamic and kinematic modelling // 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). 2017. Pp. 1-7. DOI:10.1109/ICIIECS.2017.8275962.
7. Wang Q.N., Zhai L., Wang J., Feng H. X. Study on acceleration slip regulation torque distribution control strategy for four in-wheel-motors electric vehicle steering // 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2013. Pp. 3832-3837. DOI:10.1109/CCDC.2013.6561617.
8. Huzaefa F., Liu Y. C. Centralized control architecture for cooperative object transportation using multiple omnidirectional AGVs // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2019. Pp. 6526-6532. DOI:10.1109/IROS40897.2019.8968499.
9. Dizqah A.M., Lenzo B., Sorniotti A., Gruber P., Fallah S., De Smet J. A fast and parametric torque distribution strategy for four-wheel-drive energy-efficient electric vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 7. Pp. 4367-4376. DOI: 10.1109/TIE.2016.2540584.

10. Lin C., Xu Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization // *Energies*. 2015. Vol. 8. No. 5. Pp. 3815–3831. DOI:10.3390/en8053815.
11. Guodong Y., Chengjie Z., Ning Z. The torque distribution and anti-slip regulation control for two-wheel independent drive electric vehicle // 2016 Chinese control and decision conference (CCDC). 2016. Pp. 4444–4449. DOI:10.1109/CCDC.2016.7531785.
12. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method // *Energies*. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI:10.3390/en8088537.
13. Shabanov D., Kuanyshova A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects // International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843. Art. No. 017.
14. Ishigami G., Pineda E., Overholt J., Hudas G., Iagnemma K. Design, Development, and Mobility Test of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain // *Field and Service Robotics*. 2014. Pp. 599–611. DOI:10.1007/978-3-642-40686-7_40.
15. Moore K.L., Flann N.S. A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot // *IEEE Control Systems Magazine*. 2000. Vol. 20. No. 6. Pp. 53–66. DOI:10.1109/37.887449.
16. Sorour M., Cherubini A., Fraisse P., Passama R. Motion discontinuity-robust controller for steerable mobile robots // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. Vol. 2. No. 2. Pp. 452–459. DOI:10.1109/LRA.2016.2638466.
17. Verma P., Tallamraju R., Rawat A., Chand S., Karlapalem K. Loosely coupled payload transport system with robot replacement // *Autonomous Robots and Multirobot Systems*. 2019. DOI:10.48550/arXiv.1904.03049.
18. Berenz V., Tanaka F., Suzuki K. Autonomous battery management for mobile robots based on risk and gain assessment // *Artificial Intelligence Review*. 2012. Vol. 37. No. 3. Pp. 217–237. DOI:10.1007/s10462-011-9227-9.
19. Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В. Определение поперечных сил, действующих на колеса транспортной роботизированной системы // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 12. С. 114–123. DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123.
20. Hebb D.O. *The Organization of Behavior*. New York, 1949. 335 p.

Информация об авторах

Шабанов Дмитрий Вячеславович, ассистент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Поступила 18.01.2022 г.

© Шабанов Д.В., 2023

Shabanov D.V.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

E-mail: shabanov_dv@internet.ru

EFFICIENT DISTRIBUTION OF TRACTION FORCES BETWEEN ROBOTS DURING COOPERATIVE CARGO TRANSPORTATION

Abstract. *The task of collective movement of load by wheeled robots has kinematic redundancy of drives. It allows distributing traction forces without changing the trajectory and velocity of the system. In this way, it is possible to define additional traffic quality criteria which the traction control system should strive to achieve. In addition, efficient distribution will allow the robots to move without wheel slip at a higher speed than classical control methods. Robots and cargo combined into one system mechanically and informationally, form a variable configuration transport cell (VCTC). The following transportation quality criteria are considered: no wheel slippage, maintaining a given speed, no soft bumps, minimizing work in the generator mode, maintaining the desired final charge levels of the robot batteries after transportation. The proposed methods for the efficient distribution of traction forces are based on the finding local minimum and on the Hebbian learning principle. Tests are carried out in the Simulink using the dynamic mathematical model of the VCTC. In the case under consideration, new distribution methods made it possible to increase the maximum allowable turn entry speed by 27% compared with classical control approaches. At a lower speed new method of distribution showed good results on additional transportation quality criteria. The presented material can also be used for multi-wheeled robots with steerable drive wheels.*

Keywords: *wheeled robot, mobile robot, lateral wheel force, torque distribution, traction forces, multi-wheel vehicle.*

REFERENCES

1. Dziomin U., Kabysh A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot. IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867–873. DOI:10.1109/IDAACS.2013.6663051.
2. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot. International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp. 130–140. DOI:10.1007/978-3-642-27272-1_12.
3. Tallamraju R., Verma P., Sripada V., Agrawal S., Karlapalem K. Energy Conscious Over-actuated Multi-Agent Payload Transport Robot: Simulations and Preliminary Physical Validation. 2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). 2019. Pp. 1–7. DOI:10.1109/RO-MAN46459.2019.8956442.
4. Abbaspour A., Alipour K., Jafari H.Z., Moosavian S. A. A. Optimal formation and control of cooperative wheeled mobile robots. Comptes Rendus Mécanique. 2015. Vol. 343. No. 5-6. Pp. 307–321. DOI:10.1016/j.crme.2015.04.003.
5. Danapalasingam K.A. Electric vehicle traction control for optimal energy consumption. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. 2013. Vol. 5. No. 3. Pp. 233–252. DOI:10.1504/IJEHV.2013.057607.
6. Shijin C.S., Udayakumar K. Speed control of wheeled mobile robots using PID with dynamic and kinematic modelling. 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). 2017. Pp. 1–7. DOI:10.1109/ICIIECS.2017.8275962.
7. Wang Q.N., Zhai L., Wang J., Feng H.X. Study on acceleration slip regulation torque distribution control strategy for four in-wheel-motors electric vehicle steering. 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2013. Pp. 3832–3837. DOI:10.1109/CCDC.2013.6561617.
8. Huzaefa F., Liu Y.C. Centralized control architecture for cooperative object transportation using multiple omnidirectional AGVs. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2019. Pp. 6526–6532. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8968499.
9. Dizqah A.M., Lenzo B., Sorniotti A., Gruber P., Fallah S., De Smet J. A fast and parametric torque distribution strategy for four-wheel-drive energy-efficient electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 7. Pp. 4367–4376. DOI:10.1109/TIE.2016.2540584.
10. Lin C., Xu Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization. Energies. 2015. Vol. 8. No. 5. Pp. 3815–3831. DOI:10.3390/en8053815.
11. Guodong Y., Chengjie Z., Ning Z. The torque distribution and anti-slip regulation control for two-wheel independent drive electric vehicle. 2016 Chinese control and decision conference (CCDC). 2016. Pp. 4444–4449. DOI:10.1109/CCDC.2016.7531785.
12. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method. Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI:10.3390/en8088537.
13. Shabanov D., Kuanysheva A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects. International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843. Art. No. 017.
14. Ishigami G., Pineda E., Overholt J., Hudas G., Iagnemma K. Design, Development, and Mobility Test of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain. Field and Service Robotics. 2014. Pp. 599–611. DOI:10.1007/978-3-642-40686-7_40.
15. Moore K. L., Flann N. S. A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot. IEEE Control Systems Magazine. 2000. Vol. 20. No. 6. Pp. 53–66. DOI:10.1109/37.887449.
16. Sorour M., Cherubini A., Fraise P., Passama R. Motion discontinuity-robust controller for steerable mobile robots. IEEE Robotics and Automation Letters. 2016. Vol. 2. No. 2. Pp. 452–459. DOI:10.1109/LRA.2016.2638466.
17. Verma P., Tallamraju R., Rawat A., Chand S., Karlapalem K. Loosely coupled payload transport system with robot replacement. Autonomous Robots and Multirobot Systems. 2019. DOI:10.48550/arXiv.1904.03049.
18. Berenz V., Tanaka F., Suzuki K. Autonomous battery management for mobile robots based on risk and gain assessment. Artificial Intelligence Review. 2012. Vol. 37. No. 3. Pp. 217–237. DOI:10.1007/s10462-011-9227-9.
19. Shabanov D.V., Volkov A.N., Cheusova A.I., Kochneva O.V. Estimating the lateral forces, that impact on the wheels of a transport robotic system [Opredelenie poperechnykh sil, deystvuyushchikh na kolesa transportnoj robotizirovannoy sistemy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 114–123. (rus) DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123.
20. Hebb D.O. The Organization of Behavior. New York, 1949. 335 p.

Information about the authors

Shabanov, Dmitrii V. Teaching assistant. E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Received 18.01.2023

Для цитирования:

Шабанов Д.В. Эффективное распределение тяговых сил между роботами при групповой транспортировке груза // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 106–118. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-106-118

For citation:

Shabanov D.V. Efficient distribution of traction forces between robots during cooperative cargo transportation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 106–118. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-106-118

ПОВЫШЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕГУЛИРУЕМЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ КАМАЗ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с повышением потенциала работоспособности регулируемых механизмов, на примере системы газораспределения двигателя КАМАЗ серии 740.735. В первую очередь проводится теоретический анализ и рассматриваются различные подходы к оценке потенциальной работоспособности регулируемых механизмов, после чего проводится анализ всех составляющих, напрямую влияющих на значение запаса потенциальной работоспособности как для регулируемых механизмов в целом, так и для газораспределительных механизмов. При этом основной задачей является оптимизация технологического процесса производства газораспределительного механизма двигателей КАМАЗ, с целью приращения потенциала работоспособности, для чего вводится обобщенный показатель «время-сечение», параметры которого исследуются экспериментально, с дальнейшим анализом и расчетом экспериментальных данных с использованием программного обеспечения STATISTICA DOE. С ее помощью выполнялось проведение дисперсионного анализа результатов многофакторного эксперимента, где использовалась методика, основанная на принципе разложения суммарной дисперсии на составляющие по отдельным факторам для впускного и выпускного клапанов. В результате проведенных исследований принято решение об исследовании состояния выбранной системы газораспределения уже в период эксплуатации (до первого ТО), что позволит повысить достоверность оценки запаса потенциальной работоспособности исследуемого узла.

Ключевые слова: регулируемый механизм, потенциал работоспособности, двигатель, ресурс, оптимизация, технологический процесс производства, регулировочные операции, зазор, параметры, впускной клапан, выпускной клапан, параметр «время – сечение», надежность.

Введение. При решении определенного круга задач, направленных на обеспечение качества изделий машиностроения при снижении их себестоимости, используется понятие «потенциал работоспособности». В частности, этот термин используется авторами [1–3] для решения задач по обоснованию оптимизации допусков деталей, а также оптимизации как технологических процессов сборки, так и технологических процессов производства.

Решение подобных задач во многом может осложняться их многоплановостью и структурной сложностью, поэтому в процессе решения предлагается использовать обобщенные показатели, достаточно чутко реагирующие на любые изменения и корректировки в анализируемой системе.

В качестве одного из таких показателей можно использовать средние затраты на повышение долговечности сборочной единицы или нескольких единиц, повышающих потенциал работоспособности всего узла. В структуре этого показателя потенциал работоспособности участвует лишь своей частью – изменением или приращением потенциала, вызванным регулировочными воздействиями, проводимыми на финишных операциях [3, 4].

Отметим, что такие приращения потенциала возможно получить неоднократно, уже и во время эксплуатации, путем проведения регулировочных операций. В настоящей статье рассматривается повышение потенциала работоспособности регулируемых механизмов только на этапе производства, а повышение потенциала уже на этапе эксплуатации – задача, которая будет логическим продолжением данных исследований.

Анализ потенциальной работоспособности регулируемых механизмов. Назовём изменение запасом потенциальной работоспособности F , а предлагаемый показатель R – эффективностью функционирования технологической системы рассматриваемого узла или подсистемы машины:

$$R = \frac{\bar{C}}{\bar{F}}, \quad (1)$$

где $\bar{C}$ – средние затраты на повышение потенциальной работоспособности рассматриваемой подсистемы;

$\bar{F}$ – средний запас повышения потенциальной работоспособности, формируемый при этом.

Если оценка величины затрат $\bar{C}$ не вызовет затруднений, то определение величины $\bar{F}$ – задача, требующая рассмотрения на методическом уровне, где методика должна быть основана на

использовании теории точности механизмов, теории надежности и моделях повышения работоспособности машин.

Потенциал работоспособности может быть выражен различными характеристиками, изменение которых могло бы наглядно оценивать состояние узла в целом. В качестве такой характеристики может быть использован обобщенный показатель качества, характеризующий как техническое состояние узла, так и запас его потенциальной работоспособности.

Отметим, что такой показатель должен отвечать следующим требованиям:

1. оказание непосредственного влияния на состояние узла или механизма в целом, подсистемами которого являются его детали;
2. показатель должен быть расчетным и диагностируемым;
3. показатели качества элементов или сборочных единиц изделия или узла, а также другие выходные показатели должны приводиться к нему тем или иным образом.

Дополнительно, хотелось бы отметить, что для подавляющего числа механизмов основным показателем состояния считается так называемая «ошибка» или зазор механизма [3, 5, 6], однако она не всегда в явной форме отражает влияние состояния механизма на систему высшего уровня и в конечном итоге требует проведения дополнительных исследований, направленных на установление связи ошибки механизма с состоянием системы.

Согласно формуле (2), запас потенциальной работоспособности F равен разности между эталонным значением выбранного показателя, формуемым при изготовлении F_0 , и реальным значением этого же показателя у конкретного узла, соответствующим предельному допустимому значению F_n :

$$F = F_0 - F_n. \quad (2)$$

Приближение значений показателей к предельно допустимым обуславливает необходимость проведения определенного комплекса мероприятий по повышению значения потенциала. Однако, методы повышения потенциала работоспособности обусловлены конструктивными особенностями изделия, поэтому могут быть реализованы различными методами.

Прежде всего, увеличение значения потенциала работоспособности, выраженного выходным показателем состояния механизма, предлагается обеспечить с помощью регулирования во время дополнительных финишных операций, дополняющих производственный процесс. Повысить потенциал работоспособности возможно также с помощью определенного количества регулировок «п».

Для регулируемых механизмов исходное значение потенциала работоспособности - это сумма как минимум двух составляющих:

$$F_0 = F_0^H + F_0^B, \quad (3)$$

где F_0^H – невосстанавливаемая составляющая потенциала;

F_0^B – восстанавливаемая составляющая потенциала.

В качестве невосстанавливаемой составляющей потенциала работоспособности регулируемых механизмов выступает часть величины F_0 , которая может быть компенсирована изменением размеров составляющих звеньев при изготовлении, и не может быть компенсирована регулировкой на финишных операциях производственного процесса. В качестве восстанавливаемой составляющей потенциала выступает часть величины F_0 , которая может быть компенсирована регулировочными воздействиями на финишных операциях.

Модель потребления запаса потенциальной работоспособности подтверждает, что необходимость регулировочных воздействий определяется не по действительному значению потенциала, а лишь по расхождению действительного общего значения потенциала механизма и действительного значения невосстанавливаемой составляющей на момент времени t_k . Проявление этого расхождения обычно называют регулировочным параметром, в качестве которого выступает ошибка механизма.

Для них можно установить свои предельные значения:

$$F_n' = F_n^H - F_n^B, \quad (4)$$

где F_n^H – действительное значение невосстанавливаемой составляющей работоспособности;

F_n^B – действительное значение общего потенциала работоспособности.

Основной проблемой в определении величины запаса потенциальной работоспособности регулируемых механизмов является определение предельных значений основных показателей их звеньев. Достижение предельного состояния регулируемыми механизмами также может быть обусловлено следующими причинами:

1. исчерпанием возможности восстановления состояния механизма путем регулировок, то есть изменением составляющей от F_0^B до 0;

2. переходом собранного механизма в состояние, характеризуемое значением невосстанавливаемой составляющей, меньшим, чем исходное ($F_0^H > F_{tk}^H$);

3. переходом механизма из группы регулируемых механизмов в группу нерегулируемых в связи с исчерпанием возможности восстановления уже в процессе длительной эксплуатации. Дополнительное ухудшение при этом равно ΔF_d .

Теоретически регулируемый механизм находится в предельном состоянии, когда его запас потенциальной работоспособности равен нулю. Однако, на практике, в условиях производства, достижение предельного состояния регулируемых механизмов может иметь место и в таких случаях, когда запас потенциальной работоспособности не равен 0.

Этим обуславливается и введенный термин – «запас потенциальной работоспособности», характеризующий потенциальные возможности механизма, которые могут быть использованы реализованы в полной мере, как путем оптимизации составляющих размеров, так и с помощью регулировочных воздействий [5, 6, 8]. Отметим, что такие воздействия могут проводиться как на финишных операциях производственного процесса, так и во время предпродажной подготовки нового автомобиля.

Абсолютное значение потенциала работоспособности, характеризующее состояние механизма можно найти по зависимости:

$$F_n = F_d^H - \Delta F_d, \quad (5)$$

где $(F_0^H - F_d^H)$ – изменение невосстанавливаемой составляющей потенциала;

$[F_0^B]$ – восстанавливаемая составляющая потенциала;

ΔF_d – дополнительная составляющая.

Таким образом, можно установить, что повышение потенциала работоспособности, названное в нашей задаче «запасом потенциальной работоспособности» – это сумма трех составляющих.

Дополнительно, отметим, что для ряда автомобильных узлов и механизмов состояние, при котором они неспособны выполнять предназначенные ими функции отличается от состояния, при котором качество выполняемых функций перестает удовлетворять потребителя, то есть может иметь место случай, именуемый «параметрической надежностью» [1, 2, 7].

В этом случае еще одним немаловажным условием, которому должен удовлетворять выбираемый показатель состояния, должно являться следующее: выбранный показатель состояния

где F_d^H – действительное значение невосстанавливаемой составляющей потенциала работоспособности;

ΔF_d – дополнительное изменение значения показателя состояния, обусловленное переходом механизма из группы регулируемых в группу нерегулируемых из-за ошибок, возникших при сборке (когда размеры всех составляющих будут находиться в пределах полей допусков, но суммарно все значения будут находиться на границе этих полей).

Величина ΔF_d есть не что иное, как максимальное значение регулировочного параметра. Достижение регулируемым механизмом предельного состояния определяется характером и интенсивностью изменения состояния его элементов (звеньев), определяющих значения восстанавливаемой F^B (и соответственно дополнительной ΔF_d) и невосстанавливаемой F^H .

Это, в конечном счете, приводит к тому, что общее значение потенциала, характеризующее предельное состояние, в зависимости от конструкции и особенностей функционирования механизма будет определяться либо предельными значениями F_d^H и ΔF_d в отдельности, либо в определенных их соотношениях.

В общем случае, с учетом зависимостей (2, 3, 5) запас потенциала работоспособности регулируемого механизма можно выразить в виде зависимости:

$$F = F_0 - F_n = F_0^H + F_0^B - F_d^H - \Delta F_d = (F_0^H - F_d^H) + [F_0^B] + \Delta F_d, \quad (6)$$

должен характеризовать качество выполняемых механизмом функций в вышестоящей системе.

Оценка запаса потенциальной работоспособности газораспределительного механизма. Механизм газораспределения ДВС является типичным примером регулируемого механизма, и ДВС для него как раз и будет являться вышестоящей системой.

После анализа основных теоретических подходов к оценке формуемого работоспособности регулируемых механизмов, в качестве примера проведем оценку запаса потенциальной работоспособности газораспределительного механизма двигателя КАМАЗ серии 740.735.

Важнейшей и первостепенной задачей при оценке работоспособности будет являться выбор обобщенного показателя, который в дальнейшем будет использоваться для оценки потенциала работоспособности. Для газораспределительного механизма ДВС таким показателем может являться пропускная способность клапанов [11, 12].

Пропускную способность клапанов можно оценить с помощью интегральной характеристики f , которую называют «время-сечение»:

$$f = \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt = \frac{1}{\omega} \int_0^{\Phi} F_{\text{кл}} d\Phi, \quad (7)$$

где ω – частота вращения коленчатого вала;

$F_{\text{кл}}$ – переменная площадь прохода ого сечения клапана;

$[0, \Phi]$ – длительность открытия клапана по углу поворота коленчатого вала.

Использование данной характеристики связано с тем, что максимальные величины подъема и проходного сечения клапанов недостаточны для суждения об их пропускной способности,

$$f = \frac{1}{\omega} \left[\int_0^{\Phi_0^H} F_{\text{кл}}^I d\Phi + \int_{\Phi_0^H}^{\Phi_{00}^H} F_{\text{кл}}^{II} d\Phi + \int_{\Phi_{00}^H}^{\Phi_{00}^C} F_{\text{кл}}^{III} d\Phi + \int_{\Phi_{00}^C}^{\Phi_0^C} F_{\text{кл}}^{IV} d\Phi + \int_{\Phi_0^C}^{\Phi} F_{\text{кл}}^I d\Phi \right], \quad (8)$$

где Φ_0^H, Φ_{00}^H – точки перехода между зависимостями по углу поворота коленчатого вала для набегающей части профиля кулачка;

Φ_0^C, Φ_{00}^C – точки перехода между зависимостями по углу поворота коленчатого вала для сбегавшей части профиля кулачка.

Дополнительно отметим, что ряд факторов, влияющих на пропускную способность клапанов можно не учитывать, поскольку они постоянно присутствуют в процессе функционирования газораспределительного механизма. Так, например, влияние переменной ω можно не учитывать, так как все испытываемые двигатели будут работать в одинаковых эксплуатационных условиях.

Из вышеприведенных зависимостей, можно выделить пять основных технологических параметров качества деталей газораспределительных механизмов ДВС, формирующих величину показателя «время-сечение» как для впускных, так и для выпускных клапанов:

1. диаметр фаски клапана ($d_{\text{фк}}$);
2. диаметр фаски седла (d_{00});
3. диаметр горловины седла (d_f);
4. величина подъема клапана при i -м угле поворота коленчатого вала ($H_{\text{кл}}$);
5. оптимальный угол наклона фаски клапана ($\alpha_{\text{кл}}$).

Далее постараемся минимизировать количество параметров с учётом их влияния на показатель «время-сечение». Так, параметр $\alpha_{\text{кл}}$ в рассмотрение можно не принимать, поскольку вследствие чрезвычайно малого влияния на абсолютное значение показателя «время-сечение» [7, 8, 12]. Кроме того, его влияние в любом случае будет учтено при оценке пределов изменения показателя d_m .

особенно при различных фазах газораспределения.

При этом значение показателя «время-сечение» напрямую можно связать с технико-экономическими показателями двигателя (мощностью, топливной экономичностью, крутящим моментом), так и с экологическими показателями [4, 6].

Методику расчета величины показателя «время-сечение» двигателя КАМАЗ-740.735 проведем исходя из соотношений диаметра горловины седла и меньшего диаметра конуса фаски клапана [5, 6], откуда расчет закона изменения проходного сечения клапана можно выразить в виде зависимости (8):

Показатель значения высоты подъема клапана $H_{\text{кл}}$ можно определить без проведения изменений, как произведение высоты подъема профиля кулачка на коэффициент передачи механизма привода клапана [13]. Отметим, что факторы, влияющие на пропускную способность клапанов, в расчете можно не учитывать, в связи с тем, они постоянно присутствуют при работе двигателя [14, 15].

Поэтому в дальнейших исследованиях будем принимать во внимание только вышеприведенные показатели 1-3, линейные размеры которых и будут являться основой для дальнейших исследований.

Далее оценка степени влияния технологических параметров деталей газораспределительного на рассеивание основного показателя может быть проведена с помощью составления так называемого «баланса точности», который позволит определить удельный вес влияния трех оставшихся параметров на значение показателя «время-сечение».

Экспериментальные исследования запаса потенциальной работоспособности газораспределительного механизма двигателя КАМАЗ серии 740.735. Такой «баланс точности» может быть составлен при проведении дисперсионного анализа, путем использования экспериментальных данных замеров пяти газораспределительных механизмов ДВС серии КАМАЗ серии 740.735.

Для проведения такого анализа необходим расчетный многофакторный эксперимент, который был проведен с использованием программного обеспечения STATISTICA с использованием модуля «Планирование экспериментов» (STATISTICA DOE), где расчеты проводилось по схеме полного трехфакторного эксперимента относительно трех факторов: X_1 (диаметр фаски

клапана), X_2 (диаметр фаски седла) и X_3 (диаметр горловины седла), как для впускных, так и вы-

пускных клапанов выбранного двигателя. Результаты измерений представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты эксперимента при измерении впускных клапанов двигателей КАМАЗ 740.735

Обозначения факторов	Параметры	$X_{\max}$	$X_{\min}$	Интервал
X_1	$d_m^{\text{вп}}$, мм	44,345	43,994	0,351
X_2	$d_0^{\text{вп}}$, мм	50,400	50,219	0,181
X_3	$d_r^{\text{вп}}$, мм	47,100	47,068	0,032

Таблица 2

Результаты эксперимента при измерении выпускных клапанов двигателей КАМАЗ 740.735

Обозначения факторов	Параметры	$X_{\max}$	$X_{\min}$	Интервал
X_1	$d_m^{\text{вып}}$, мм	39,850	39,508	0,342
X_2	$d_0^{\text{вып}}$, мм	45,400	45,245	0,155
X_3	$d_r^{\text{вып}}$, мм	42,100	42,072	0,028

Таблица 3

Удельный вес влияния трех факторов на значение показателя «время-сечение»

№	Факторы	Удельный вес влияния, %	
		впускной	выпускной
1	X_1	80,551	83,213
2	X_2	18,133	15,562
3	X_3	0,311	0,142
Совместное влияние			
5	$X_1 X_2$	0,334	0,501
6	$X_1 X_3$	0,248	0,264
7	$X_2 X_3$	0,311	0,243
8	$X_1 X_2 X_3$	0,112	0,075
Сумма		100	100

Для проведения дисперсионного анализа результатов многофакторного эксперимента использовалась методика, которая заключалась в разложении суммарной дисперсии на составляющие по отдельным факторам для впускного и выпускного клапанов по одному алгоритму. Результаты расчета приведены в таблицу 3.

Выводы.

Согласно полученным результатам дисперсионного анализа, можно утверждать следующее:

1. среди выделенных технологических показателей качества деталей ГРМ наибольшее влияние на формируемую величину время-сечения как впускного, так и выпускного клапанов нового двигателя оказывает диаметр конуса фаски клапана (около 81 %, 83 % для впускного и выпускного клапанов соответственно, диаметр конуса фаски седла (около 18 % и 16 %);

2. изменения диаметра горловины седла клапана d_r , а также совместное влияние факторов - незначительны;

3. дальнейшая эксплуатация двигателей будет приводить к изменению пределов варьирования исследуемых факторов, в связи с износом кулачков распределительного вала, изменением регулировочного зазора в газораспределительном механизме и т.п. При этом, особенностью исследуемого механизма газораспределения является то, что в связи с эксплуатационной притиркой клапанов будут меняться диаметры фасок клапанов d_m и при этом расти значения параметров d_0 .

Именно поэтому необходимо разработать и внедрить в технологический процесс производства дополнительную операцию, проводимую с целью притирки клапанов еще на этапе производства, с учетом выявленных закономерностей.

Кроме того, из приведенных исследований можно сделать вывод, что изменение пределов варьирования может привести к перераспределению удельного веса выделенных факторов.

Проведение подобного дисперсионного анализа необходимо провести на нескольких временных отрезках эксплуатации двигателей КАМАЗ серии 740.735. Поэтому, далее будет собираться информация о показателях, формирующих величину показателя «время-сечение» при различных наработках. В результате, возможно будет принять более обоснованные решения при подборе режимов как для регулировочных, так и для финишных (притирочных) операций, но с учетом дополнительных данных, что, в конечном итоге, позволит повысить достоверность оценки

запаса потенциальной работоспособности механизма газораспределения двигателя КАМАЗ серии 740.735. Исследования по данной теме будут продолжены.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов А.П., Дехтеринский Л.В., Норкин С.Б., Скрипников С.А. Теория потенциала работоспособности и ремонтного резервирования надежности стареющих технических систем: Учебное пособие. М: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2013. 104 с.
2. Проников А.С. Надежность машин М.: ЕЕ Медиа, 2012. 593 с.
3. Гриб В.В., Зорин В.А., Жуков Р.В. Многокритериальная оценка технического состояния механизмов и машин (динамика и изнашивание) // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 6. С. 19–22.
4. Норкин С.Б., Павлов А.П., Михайлов С.А. Прогноз параметров надежности базового комплекта двигателя на стадии проектирования // Проблемы индустриального ремонта автомобилей и дорожных машин: сб. науч. тр. М.: МАДИ (ТУ), 1995. С. 60–66.
5. Гаевский В.В., Хаваев Д.А., Муравьев И.И. Увеличение эксплуатационного ресурса элементов силовых установок // Грузовик. 2019. № 5. С. 6–9.
6. Дехтеринский Л.В. Прогнозная оценка надежности технических систем на этапе проектирования // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). 2004. № 2. С. 41–47.
7. Самуйло В.В., Ковалевский В.Н., Гончарук А.И., Долговых С.Н. Диагностирование работоспособности газораспределительного механизма двигателей автомобилей семейства КамАЗ при сервисном обслуживании и технической эксплуатации // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : Тезисы докладов всероссийской научно-практической конференции 2019. С. 49.
8. Бобровников Д.Е. Экспериментальные исследования влияния фаз газораспределения на мощностные показатели двигателя внутреннего сгорания // Международный технико-экономический журнал. 2013. № 4. С. 85–87.
9. Швеева Е.И., Шибиков В.Г., Швеев И.А. Причины возникновения преждевременного износа ГРМ двигателя КАМАЗ-740 // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73, № 3. С. 15–21.
10. Павлов А.П., Перфилов А.С. Обоснование эффективности применения стратегии эксплуатационного резервирования методом использования ремонтных комплектов // Авто-транспортное предприятие. 2011. № 12. С. 50–52.
11. Максимов А.В., Зими́на Л.А., Адига́мов Н.Р., Зига́ншин Б.Г. Исследование гидравлического привода клапанов ГРМ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17, № 2(66). С. 84–91. DOI:10.12737/2073-0462-2022-84-91.
12. Гаффаров Г.Г. Проблемы и перспективы повышения эксплуатационной надежности ГРМ двигателей КамАЗ // Автомобильная промышленность. 2022. № 11. С. 12–17.
13. Пашков П.В., Германович А.С., Ломовских А.Е. Ремонт деталей газораспределительного механизма двигателя КАМАЗ-740 // Новые технологии и технические средства для эффективного развития АПК. Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. С. 229–233.
14. Швеев А.И., Швеев И.А. Моделирование степени износа толкателя клапана ГРМ КАМАЗ при эксплуатации // Автомобильная промышленность. 2013. № 4. С. 26–32.
15. Морозов А.В., Фрилинг В.А., Салов В.Б. Анализ причин и характера износа отверстия коромысла клапана грм двигателя КАМАЗ 740.11-240 // Техника и технологии: пути инновационного развития. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2011. С. 93–96.

Информация об авторах

Пегачков Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства и ремонта автомобилей и дорожных машин. E-mail: pegachkov@yandex.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект д.64.

Поступила 20.02.2023 г.

© Пегачков А.А., 2023

Pegachkov A.A.

Moscow automobile and road construction state technical university

E-mail: pegachkov@yandex.ru

IMPROVING THE PERFORMANCE OF ADJUSTABLE MECHANISMS BY EXAMPLE GAS DISTRIBUTION SYSTEMS FOR KAMAZ ENGINES

Abstract. This article deals with issues related to increasing the performance potential of adjustable mechanisms, using the gas distribution system of KAMAZ 740.735 engine. In the first place, a theoretical analysis is carried out and various approaches are considered to assess the potential performance of the regulated mechanisms, after which the analysis of all components, directly affecting the potential performance reserve for both regulated mechanisms in general and gas distribution mechanisms. At the same time, the main task is to optimize the technological process for the manufacturing the gas distribution mechanism of KAMAZ engines, in order to increase the performance potential, for which a generalized "time- flow section" indicator is introduced. Its parameters are studied experimentally, with further analysis and calculation of experimental data using the STATISTICA DOE software. The use of this program helps in conducting a dispersion analysis of the results of a multivariate experiment. The technique is used based on the principle of decomposing the total dispersion into components by separate factors for the intake and exhaust valves. As a result of the researches, it is decided to investigate the state of the selected gas distribution system during the operation period (before the 1-st maintenance), which will be able to increase the reliability of assessing the potential performance of selected gas distribution mechanism.

Keywords: adjustable mechanism, performance potential, engine, resource, optimization, technological process of production, adjustment operations, clearance, reliability, parameters, intake valve, exhaust valve, «time - flow section» parameter, reliability

REFERENCES

1. Pavlov A.P., Dekhterinsky L.V. Norkin S.B. Skripnikov S.A. Theory of the potential for performance and repair redundancy of the reliability of aging technical systems. [Teoriya potentsiala rabotosposobnosti i remontnogo rezervirovaniya nadezhnosti stareyushchih tekhnicheskikh system]. M: Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI), 2013. 104 p.(rus)
2. Pronikov A.S. Reliability of machines. [nadezhnost' mashin].M.: EE Media, 2012. 593 p. (rus)
3. Grib V.V., Zorin V.A., Zhukov R.V. Multi-criteria assessment of the technical condition of mechanisms and machines (dynamics and wear). [Mnogokriterial'naya ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov i mashin (dinamika i iznashivanie)] Remont. Recovery. Modernization. 2016. No. 6. Pp. 19–22. (rus)
4. Norkin S.B., Pavlov A.P., Mikhailov S.A. Forecast of reliability parameters of the basic engine set at the design stage [Prognoz parametrov nadezhnosti bazovogo komplekta dvigatelya na stadii proektirovaniya]. Problemy industrial'nogo remonta avtomobilej i dorozhnyh mashin: sbornik nauchnyh trudov M.: MADI, 1995. Pp. 60–66.(rus)
5. Gaevsky V.V., Khavaev D.A., Muravyov I.I. Increasing the service life of elements of power plants [Uvelichenie ekspluatsionnogo resursa elementov silovyh ustanovok] Truck.2019. No. 5. Pp. 6–9. (rus)
6. Dekhterinsky L.V. Predictive assessment of the reliability of technical systems at the design stage [Prognoznaya ocenka nadezhnosti tekhnicheskikh sistem na etape proektirovaniya]. Vestnik Moskovskogo Avtomobilno-dorozhnogo instituta . 2004. No. 2. Pp. 41–47. (rus)
7. Samuilov V.V., Kovalevsky V.N., Goncharuk A.I., Dolgovykh S.N. Diagnostics of the performance of the gas distribution mechanism of KamAZ engines during service maintenance and technical operation [Dagnostirovanie rabotosposobnosti gazoraspre-delitel'nogo mekhanizma dvigatelej avtomobilej semejstva KamAZ pri servisnom obsluzhivanii i tekhnicheskoy ekspluatacii]. Agropromyshlennyj kompleks: problemy i perspektivy razvitiya 2019. 49 p. (rus)
8. Bobrovnikov D.E. Experimental studies of the influence of gas distribution phases on the power indicators of an internal combustion engine [Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya faz gazoraspre-deleniya na moshchnostnye pokazateli dvigatelya vnutrennego sgoraniya] International technical and economic magazine. 2013. No. 4. Pp. 85–87. (rus)
9. Shveeva E.I., Shibakov V.G., Shveev I.A. Causes of premature wear of the timing of the KAMAZ-740 engine [Prichiny vzniknoveniya prezhdvremennogo iznosa GRM dvigatelya KAMAZ-740]. Bulletin of the Kazan State Technical University. A.N. Tupolev. 2017. Vol. 73, No. 3. Pp. 15–21.(rus)
10. Pavlov A.P., Perfilov A.S. Substantiation of the effectiveness of the application of the strategy of operational redundancy by the method of using repair kits [Obosnovanie effektivnosti primeneniya strategii ekspluatsionnogo rezervirovaniya

metodom ispol'zovaniya remontnyh komplektov]. Avtotransportnoe predpriyatie. 2011. No. 12. Pp. 50–52. (rus)

11. Maksimov A.V., Zimina L.A., Adigamov N.R., Ziganshin B.G. Study of the hydraulic drive of timing valves [Issledovanie gidravlicheskogo privoda klapанov GRM] Bulletin of the Kazan State Agrarian University. 2022. Vol. 17, No. 2 (66). Pp. 84–91. (rus) DOI:10.12737/2073-0462-2022-84-91.

12. Gaffarov G.G. Problems and prospects for improving the operational reliability of the timing of KamAZ engines [Problemy i perspektivy povysheniya ekspluatatsionnoj nadezhnosti GRM dvigatelej KamAZ]. Automotive industry. 2022. No. 11. Pp. 12–17. (rus)

13. Pashkov P.V., Germanovich A.S., Lomovskikh A.E. Repair of parts of the gas distribution

mechanism of the KAMAZ-740 engine [Remont detalej gazoraspreditel'nogo mekhanizma dvigatelya KAMAZ-740]. Novye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya effektivnogo razvitiya APK. 2019. Pp. 229–233. (rus)

14. Shveev A.I., Shveev I.A. Modeling the degree of wear of the KAMAZ timing valve tappet during operation [Modelirovanie stepeni iznosa tolkatel'ya klapana GRM KAMAZ pri ekspluatatsii]. Automotive industry. 2013. No. 4. Pp. 26–32. (rus)

15. Morozov A.V., Friling V.A., Salov V.B. Analysis of the causes and nature of wear of the hole of the rocker arm of the timing valve of the KAMAZ 740.11-240 engine [Analiz prichin i haraktera iznosa otverstiya koromysla klapana grm dvigatelya KAMAZ 740.11-240] Engineering and technology: ways of innovative development Kursk: South-Western State University, 2011. Pp. 93–96. (rus)

Information about the authors

Pegachkov, Alexey A. PhD. E-mail: pegachkov@yandex.ru. Moscow automobile and road construction state technical University (MADI). Russia, 125319, Leningradskiy prospect, 64.

Received 20.02.2023

Для цитирования:

Пегачков А.А. Повышение потенциала работоспособности регулируемых механизмов на примере системы газораспределения двигателя КАМАЗ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 119–126. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-119-126

For citation:

Pegachkov A.A. Improving the performance of adjustable mechanisms by example gas distribution systems for KAMAZ engines. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 119–126. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-119-126

