

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

7

2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Г. ШУХОВА

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

№ 7, 2024 год

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

Vol. 7. 2024

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)
- 2.1.14. – Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)
- 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. 522 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	12.07.2024
Выход в свет	19.07.2024

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,07. Уч.-изд. л. 15,13. Тираж 40 экз. Заказ № 92

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2024

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)
- 2.1.14. – Life-cycle management of construction projects (technical sciences)
- 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. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	12.07.2024

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, 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, академик 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).

Буриянов 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).

Воробьев Валерий Степанович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии, организации и экономики строительства, Сибирский государственный университет путей сообщения (РФ, г. Новосибирск).

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, научный руководитель АО «КТБ Железобетон» (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., НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

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).

Ильицкая 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 академии 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).

Лесовик Руслан Валерьевич, д-р техн. наук, проректор по международной деятельности, проф. кафедры 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).

Мешерин 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., заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., директор 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).

Полужкова Валентина Анатальевна – д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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).

Северигина Надежда Савельевна, д-р техн. наук, проф. кафедры технического сервиса машин и оборудования, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева (РФ, г. Москва).

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф. кафедры градостроительства 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).

Сивенков Андрей Борисович, д-р техн. наук, проф., кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (РФ, г. Москва).

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).

Тиратуриян Артем Николаевич, д-р техн. наук, проф. кафедры автомобильных дорог, Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону).

Фишер Ханс-Берtram, 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).

Ялун 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, Academician 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).

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

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

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

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

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).

Valery S. Vorob'ev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian Transport University (Russian Federation, Novosibirsk).

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, KTB Beton Group (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, Moscow State University of civil engineering (National research university) (Russian Federation, Moscow).

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).

Ruslan V. Lesovik, 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).

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

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).

Nadezhda S. Sevryugina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Russian Federation, Moscow).

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).

Andrey B. Sivenkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

Artem N. Tiraturyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Don State Technical University, (Russian Federation, Rostov-on-Don).

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

Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Елистраткин М.Ю., Бухтияров И.Ю. СУПЕРСУЛЬФАТИРОВАННЫЕ ЦЕМЕНТЫ: ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СВОЙСТВ, СЫРЬЯ, ПЕРСПЕКТИВ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ	8
Сидорова А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ДОБАВКИ ПЕРЛИТА КАК ЭЛЕМЕНТА ВНУТРЕННЕГО УХОДА В СИСТЕМЕ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ	25
Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Се Ди СОПРОТИВЛЕНИЕ КЛАДКИ ИЗ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ НА ПОЛИУРЕТАНОВОМ КЛЕЕ ЦЕНТРАЛЬНОМУ СЖАТИЮ	35
Чебыкин Г.П., Беляева З.В., Кудрявцев С.В. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛЬНЫХ БАЛОК КРУТИЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ	43
Кузнецов И.В. ОЦЕНКА СТРАМПОВ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ УНИВЕРСАЛЬНОГО ДИЗАЙНА	56
Хмельёва Е.В., Сафаргалеев А.В. УСТАНОВЛЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДРОБНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИО-НАЛЬНЫХ ЗОН В ГЕНЕРАЛЬНЫХ ПЛАНАХ КРУПНЫХ ГОРОДОВ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО НОВГОРОДА, ПЕРМИ И ТЮМЕНИ	65
Какунец К.В. ОБЩЕСТВЕННО-АДМИНИСТРАТИВНЫЙ ЦЕНТР ВОЛОДАРСКОГО (НЕВСКОГО) РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА. ПРОЕКТЫ И ФАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ. ОСОБЕННОСТИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО И ОБЪЁМНО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО РЕШЕНИЯ	76

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Фомина И.В., Капустин Ф.Л. ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ НА ГИДРАТАЦИЮ И ТВЕРДЕНИЕ ЗОЛОЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ	88
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Севостьянов М.В., Агеева М.С., Севостьянов В.С., Фомина Е.В., Проценко А.М., Бабуков В.А., Шамгулов Р.Ю. ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ СМЕСЕЙ С ТЕХНОГЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ	98
Безмен П.А., Емельянова О.В., Яцун С.Ф. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛЕТА ПРИВЯЗНОЙ ПЛАТФОРМЫ	111

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Alfimova N.I., Levickaya K.M., Elistratkin M.Yu., Bukhtiyarov I.Yu. SUPERSULFATED CEMENTS: A REVIEW ANALYSIS OF THE FEATURES OF PROPERTIES, RAW MATERIALS, PRODUCTION AND APPLICATION PROSPECTS	8
Sidorova A.S. ANALYSIS OF PERLITE ADDITIVE AS INTERNAL CURE AGENT IN CEMENT CONCRETE SYSTEM	25
Suleymanova L.A., Esipov S.M., Se D RESISTANCE OF MASONRY MADE OF CELLULAR CONCRETE BLOCKS ON POLYURETHANE ADHESIVE TO CENTRAL COMPRESSION	35
Chebykin G.P., Beliaeva Z.V., Kudryavtsev S.V. ENSURING THE OVERALL STABILITY OF STEEL BEAMS BY TORSIONAL BRACINGS	43
Kuznetsov I.V. EVALUATING STRAMPS FOR COMPLIANCE WITH UNIVERSAL DESIGN REQUIREMENTS	56
Khmeleva E.V., Safargaleev A.V. ESTABLISHMENT AND IMPLEMENTATION OF DETAILED PARAMETERS OF FUNCTIONAL ZONES IN MASTER PLANS OF LARGE CITIES ON THE EXAMPLE OF NIZHNY NOVGOROD, PERM AND TYUMEN	65
Kakunets K.V. THE SOCIAL AND ADMINISTRATIVE CENTER OF THE VOLODARSKY (NEVSKY) DISTRICT OF ST. PETERSBURG. PROJECTS AND ACTUAL IMPLEMENTATION. FEATURES OF URBAN PLANNING AND SPATIAL SOLUTIONS	76

CHEMICAL TECHNOLOGY

Fomina I.V., Kapustin F.L. INFLUENCE OF MINERAL ADDITION ON THE HYDRATION AND THE HARDENING OF ASH-CEMENT STONE DURING HEAT AND STEAM CURING	88
--	----

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Sevostyanov M.V., Ageeva M.S., Sevostyanov V.S., Fomina E.V., Protsenko A.M., Babukov V.A., Shamgulov R.Yu. SCIENTIFIC AND TECHNICAL DEVELOPMENTS, RESEARCH OF RESOURCE-SAVING EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF COMPOSITE MIXTURES WITH MAN-MADE COMPONENTS	98
Bezmen P.A., Emelyanova O.V., Jatsun S.F. MATHEMATICAL MODELING OF A TETHERED PLATFORM'S CONTROLLED VERTICAL FLIGHT	111

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-8-24

^{1,*}Алфимова Н.И., ^{1,2}Левицкая К.М., ¹Елистраткин М.Ю., ^{1,2}Бухтияров И.Ю.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: alfimovan@mail.ru

СУПЕРСУЛЬФАТИРОВАННЫЕ ЦЕМЕНТЫ: ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СВОЙСТВ, СЫРЬЯ, ПЕРСПЕКТИВ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. В настоящее время актуальными являются исследования, направленные на разработку альтернативных вяжущих, которые могут частично или полностью заменить портландцемент. При этом приоритетами являются минимальное воздействие на экологию (в т.ч. пыление и выбросы CO₂), энергосбережение, рациональное природопользование за счёт утилизации техногенных отходов. Крайне перспективными с указанных позиций являются, суперсульфатированные цементы (ССЦ), которые на 80–85 % состоят из алюмосиликатного компонента; на 10–20 % из сульфатного компонента и 3–5 % щелочного активатора. Традиционным для ССЦ алюмосиликатным компонентом является доменный гранулированный шлак (ДГШ), однако в связи со снятием требований к содержанию в его составе оксида алюминия (не ниже 14 %), появилась возможность его частичной или полной замены другими техногенными или природными алюмосиликатными продуктами. В качестве сульфатного компонента вместо природного гипсосодержащего сырья все чаще рассматривается техногенное (фосфогипс, десульфуризационный гипс) как в форме дигидрата, так и в форме ангидрита и полугидрата. Благодаря такому составу и возможности использования в качестве основных компонентов отходов, данный вид цемента характеризуется значительно меньшими выбросами CO₂ в окружающую среду и энергетическими затратами на производство, в сравнении с портландцементом. В статье описаны особенности механизма гидратации ССЦ, предопределяющие его основные свойства: низкое тепловыделение, высокая стойкость в сульфатных и хлорных средах, кислотостойкость. Рассмотрены недостатки – длительные сроки твердения, пониженные показатели по морозостойкости, высокая скорость карбонизации. Описаны способы борьбы с недостатками ССЦ и перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: суперсульфатированный цемент, доменный гранулированный шлак, фосфогипс, щелочной активатор, карбонизация

Введение. Одним из признаков развития экономики, является рост объемов строительства, влекущий за собой увеличение потребности в вяжущих материалах. Наиболее востребованным вяжущим остается цемент, спрос на который с каждым годом увеличивается. Общемировое производство цемента в 2022 году достигло 4160 млн. тонн, из них на долю России приходится 1,46 % [1]. При этом необходимо отметить, что, даже по самым приближенным оценкам, при производстве 1 тонны цемента в окружающую среду выделяется порядка 0,94 тонн CO₂ (примерно 3,4 млн. тон в год), что составляет 5–10 % от общемировых выбросов CO₂ в окружающую среду [2–4]. Кроме того, организация производства портландцемента и сам процесс отличается многостадийностью, пылеобразованием, высоким потреблением электроэнергии и металлоёмкостью [5–7].

В связи с этим все более актуальным становится вопрос о разработке альтернативных вяжущих, которые могут частично или полностью функционально заменить портландцемент, но

при этом их производство должно обеспечивать существенно меньший экологический прессинг и значительно меньшие энергетические затраты. Одним из перспективных вяжущих, полностью соответствующих обозначенным требованиям, является суперсульфатированный цемент (ССЦ, supersulfated cement), который не содержит или содержит в минимальном количестве (до 5%) портландцементный клинкер.

Суперсульфатированные цементы в основном состоят из тонкомолотого доменного гранулированного шлака (до 80–85 %), сульфатного компонента (10–20 %) и щелочного активатора (до 5 %). В качестве щелочного активатора можно использовать портландцементный клинкер или известь. Основными продуктами гидратации являются этtringит и C-S-H [8–12].

Первый патент на данный вид вяжущего был получен в 1909 году в Германии Гансом Кюлем (Hans Kühl), именно он впервые обнаружил возможность активации молотого доменного гранулированного шлака сульфатами кальция [13]. Основным требованием, предъявляемым к шлакам,

пригодным для производства ССЦ, являлся их химический состав – шлаки должны были быть основными (т.е. с высоким содержанием $\text{CaO}+\text{MgO}$), при этом содержание оксида алюминия должно было быть в пределах 14–15 % [8]. При таком химическом составе шлаков обеспечивались высокие механические характеристики ССЦ. Обладая сопоставимой прочностью камня, по сравнению с обычным портландцементом, суперсульфатированный отличается повышенной сульфатостойкостью и низкой теплотой гидратации [8, 9].

После Второй мировой войны, из-за нехватки портландцемента ССЦ получил широкое распространение в Германии и Великобритании, на него был разработан стандарт, однако после изменения технологии производства чугуна, которое привело к снижению содержания оксида алюминия ниже допустимых значений, стандарт на ССЦ был отменен и на смену данному виду цемента пришел шлакопортландцемент [8].

В настоящее время в условиях повышенного внимания к экологическим аспектам и вопросам рационального природопользования суперсульфатированные цементы вновь привлекли внимание европейской научной общественности, на них разработан актуальный стандарт [14].

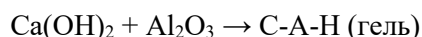
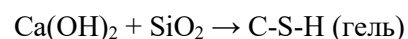
В связи с вышесказанным, целью данной статьи явилось обобщение результатов научных исследований в области суперсульфатированных цементов, а именно, анализ используемых для его производства сырьевых компонентов, механизма твердения, свойств, достоинств и недо-

статков, а также определение направлений дальнейших исследований в области производства и применения суперсульфатированных цементов.

Методология. Литературный обзор проводился путем обработки, анализа и общения данных из открытых источников, представленных в коллекции классических полнотекстовых журналов издательства Elsevier на платформе ScienceDirect.

Основная часть.

1. Механизм твердения ССЦ. Твердение и набор прочности суперсульфатированного цемента происходит в значительной степени за счет целенаправленного образования этtringита. После затворения суперсульфатированного цемента водой, на первой стадии начинается происходить растворение сульфатного и клинкерного (щелочного) компонентов с образованием ионов OH^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , а также незначительного количества Al^{3+} , Si^{4+} и т. д., после чего образуется небольшое количество геля гидросиликата кальция (C-S-H) и геля гидроалюмината кальция (C-A-H):



Гель гидроалюмината кальция дополнительно может реагировать с ионами SO_4^{2-} с образованием этtringита (AFt ; $\text{C}_3\text{F} \cdot 3\text{CS} \cdot 32\text{H}$):



Графическое изображения процесса гидратации суперсульфатированного цемента представлено на рисунке 1.

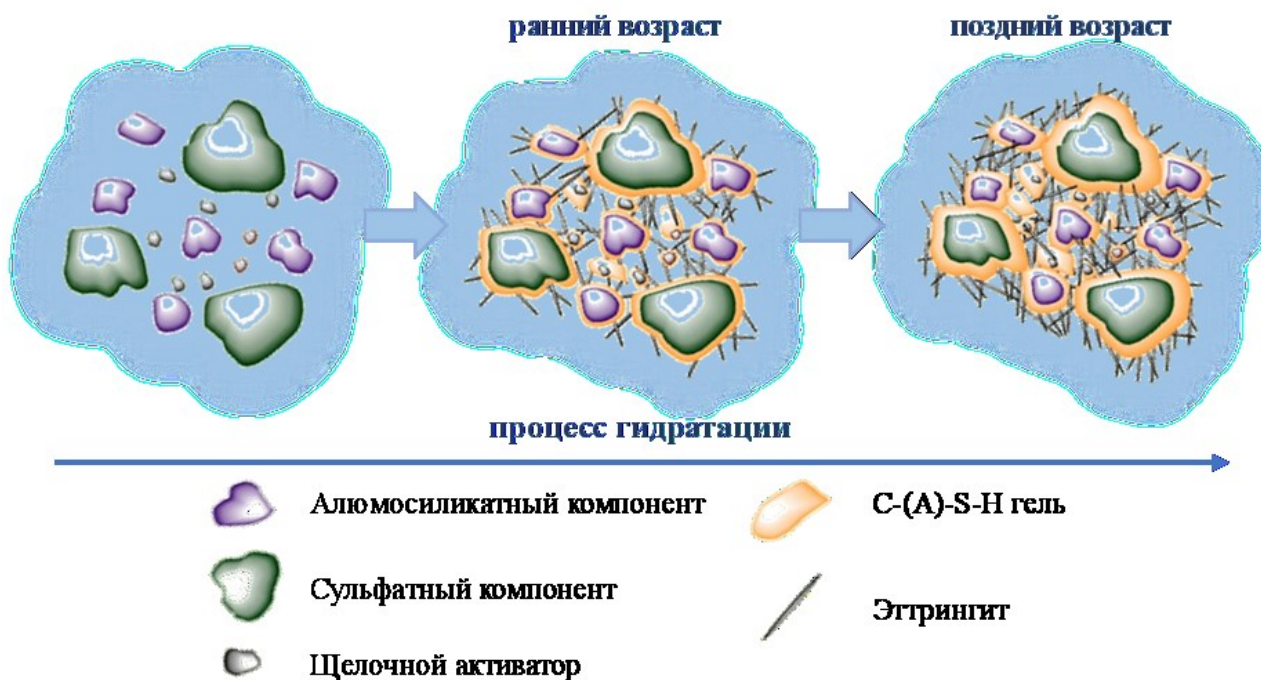
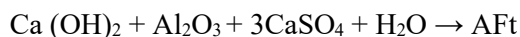


Рис. 1. Процесс гидратация суперсульфатированного цемента

В случае большого содержания ионов SO_4^{2-} в системе, эттрингит может образоваться при взаимодействии сульфат ионов, алюминатной фаза шлака и гидроксидом кальция (CH):



Объем образовавшегося в системе эттрингита будет зависит от ряда факторов – pH в поровом пространстве раствора, содержания Al_2O_3 в шлаке, условий твердения (температура, влажность), типа и содержания щелочного активатора и др.

Для растворения шлака необходимо создать определённую щелочность среды. Определяющим фактором, который будет оказывать влияние на образование эттрингита и, как следствие, раннюю прочность ССЦ является pH раствора. При высоком значении pH содержание сульфат ионов в системе будет относительно низким, что будет способствовать образованию большого количества фаз C-S-H и C-A-H с последующим образованием моносulfата алюмината кальция (AFm; $\text{C}_3\text{F} \cdot \text{C}\bar{\text{S}} \cdot 12\text{H}$):



При низких значениях pH разложение шлака будет замедленным, и, как следствие, образование эттрингита будет протекать очень медленно, что отрицательно скажется на прочности ССЦ.

Значения pH, которые обеспечивают оптимальное протекание процессов твердения ССЦ лежат в пределах 10,8 до 12,5 [10]

Еще одним определяющим фактором, напрямую влияющим на скорость образования и количество эттрингита в системе твердеющего ССЦ, как уже отмечалось ранее, является содержание Al_2O_3 в шлаке. Начальная скорость растворения шлака, кроме pH среды, имеет прямую зависимость от количества оксида алюминия в его составе. У ССЦ, изготовленного с использованием низкоалюминатного шлака, образуется меньшее количество эттрингита, что отрицательно сказывается на его прочности. Рекомендованное минимальное значение содержания оксида алюминия в шлаке должно составлять не менее 13 % [8–10].

Известно множество попыток оценить шлаки с помощью различных модулей [9], которые определяли исходя из количества оксидов, входящих в состав шлака. Наиболее широко, при оценке степени пригодности шлака для производства суперсульфатированного цемента, используется соотношение суммы оксидов кальция, магния и алюминия к оксиду кремния: $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$, которое должно быть не менее 1.

Условия твердения ССЦ также оказывают значительное влияние на свойства получаемого камня. В первую очередь, это обусловлено влиянием температуры и влажности на стабильность эттрингита. В раннем возрасте эттрингит стабилен при температуре равной 25 °C и влажности 11–100 %. При повышении температуры до 50–70 °C он становится нестабильным и, при карбонизации под воздействием CO_2 , может переходить в моносulfат [10]. При снижении относительной влажности прочность ССЦ падает. Также были проведены исследования по определению влияния типа воды (водопроводная, морская) на твердения ССЦ. Авторы [15], что на ранних сроках (3–7 суток) тип воды не оказывать влияние на прочность, негативное влияние морской воды начинает проявляться на более поздних сроках твердения (90 суток).

Большое влияние на гидратацию ССЦ оказывает тип и количество сульфатного компонента. Низкое содержание сульфата кальция (менее 10 %) и, как следствие, сульфат ионов может привести к образованию моносulfата алюминия, в тоже время при чрезмерном содержании – происходит пересыщение системы эттрингитом, который выпадая в осадок покрывает поверхность частиц шлака. Также повышенное содержание эттрингита в системе может привести к растрескиванию и снизить прочность конечного продукта.

Новообразования суперсульфатированного цемента в первые часы гидратации представлены в основном крупными кристаллами эттрингита, которые обеспечивают начало схватывания и отвечают за раннюю прочность системы. Далее между зернами эттрингита на поверхности зерен шлака начинают формироваться волокнистые или пластинчатые фазы CSH. Эттрингит отвечает за прирост прочности системы в ранние сроки, в то время как CSH-фазы отвечают за набор прочности системы во все сроки твердения. Рост новообразований способствует постепенному уплотнению системы за счет прорастания AFt в CSH и заполнения им порового пространства [8, 10].

Многие исследователи отмечают, что ввиду особенностей структурообразования, цементный камень из ССЦ, по сравнению с обычным портландцементным, отличается большими значениями общей пористости, и, в частности, повышенным содержанием гелевых пор, однако – меньшим содержанием капиллярных пор среднего размера (50–100 нм). Это предопределяет его меньшую проницаемость и большую стойкость в агрессивных средах по сравнению с обычным портландцементом [10].

2. Сырьевые материалы

Алюмосиликатный компонент. Как уже отмечалось ранее, основным компонентом суперсульфатированного цемента является шлак, его доля в смеси составляет до 85 % по массе. Чаще всего для производства ССЦ используется доменный гранулированный шлак (ДГШ) [16–38]. При этом большое значение, как уже отмечалось ранее, имеет химический состав шлака, который оказывает большое влияние на прочностные характеристики конечного продукта. Так ССЦ на основе шлака с высоким содержанием Al_2O_3 и CaO отличается быстрой реакционной способностью и более высокими показателями предела прочности при сжатии [8].

В настоящее время рассматривается возможность частичной или полной замены ДГШ на другие виды шлаков такие как фосфатный шлак [34], кислородно-конвертерный шлак [35], ферроникелевый шлак [38]. В работе [36] 5 % ДГШ заменяется кварцевый порошок, а в работе [37] рассматривается возможность замены до 20 % ДГШ метаксаолином. И если кварцевый порошок выступает как инертный компонент, то метаксаолин участвует в процессах гидратации, и при замене им 5 % низкоглиноземистого шлака оказывает положительное влияние на физико-механические характеристики ССЦ. Авторы [37] отмечают, что оксид алюминия, входящий в состав оксида алюминия, вступает в реакцию с сульфатом кальция с образованием эттрингита, что способствует уплотнению цементной матрицы и увеличению прочности на сжатие с 23 до 44 МПа.

Также в ряде работ в качестве алюмосиликатного сырья рассматривается вулканическая пемза [39, 40].

Необходимо отметить, что ССЦ на основе высокоглиноземистого доменного гранулированного шлака отличаются наибольшими показателями прочности при сжатии, однако частичная или полная его замена на другие виды сырья, позволит существенно расширить сырьевую базу для производства суперсульфатированного цемента, снизить его себестоимость, энергоёмкость и логистические расходы.

Помимо химического состава большое влияние на свойства ССЦ оказывает дисперсность алюмосиликатного компонента. Рост удельной поверхности алюмосиликатного компонента повышает его реакционную способность, что положительно отражается на прочности ССЦ как на ранних, так и на поздних сроках твердения [39].

Сульфатный компонент. В основном для производства суперсульфатированного цемента сульфатный компонент используется в виде дигидрата сульфата кальция, ангидрита и, реже, в

виде полугидрата. Если изначально использовалось природное гипсосодержащее сырьё [15–18, 36, 37], то сейчас все больше исследований направлено на поиск возможности использования в качестве источника сульфата кальция гипсосодержащих отходов промышленности [21–40], в частности фосфогипса [21–35] – как одного из самых крупнотонажных в мире. При этом рассматривалось использование фосфогипса как форме дигидрата сульфата кальция [21–24, 28], так и в форме полугидрата [24, 29, 30, 35, 39] и ангидрита [24–27, 34].

Так, в исследовании [24] авторы показали, что ССЦ, полученный с использованием термообработанного фосфогипса, имеет более высокие физико-механические характеристики по отношению к ССЦ, изготовленному с использованием дигидрата. При этом температура и длительность термообработки также отражается на свойствах ССЦ. Наилучшие показатели прочности на ранней (3 суток – 20,3 МПа) и поздней стадиях (90 суток – 53,9 МПа) были достигнуты при использовании ФГ, термообработанного при температуре 600°C в течение 2 часов. Наиболее коротким началом (55 мин) и концом (325 мин) схватывания обладал ССЦ, полученный при использовании ФГ термообработанного при температуре 350°C в течение 2 часов.

В качестве положительного момента использования полугидрата, кроме более коротких сроков схватывания, можно отметить ощутимо меньшие энергетическими затраты на его получение путем обжига в сравнении с ангидритом.

Также отмечается, что использование фосфогипса способствует образованию эттрингита на более поздних сроках твердения, что, при его оптимальном содержании, обеспечивает формирование более плотной структуры композита по отношению к ССЦ, изготовленному с использованием природного гипсового сырья [10]. Однако необходимо отметить, что фосфогипс, являясь отходом производства, отличается не только непостоянным химическим составом, но и содержит большое количество примесей, которые могут существенно влиять на процесс гидратации ССЦ. Так, в ряде исследований было установлено, что растворимый фосфор, может налипать на поверхность частиц суперсульфатированного цемента замедляя тем самым его гидратацию [10].

При обжиге фосфогипса вредные примеси удаляются и использование его в виде ангидрита и полугидрата не отражается на процессе гидратации. В тоже время, использование ФГ в виде дигидрата будет требовать дополнительных исследований по установлению влияния примесей

на процессы гидратации ССЦ и разработки мероприятий по нейтрализации негативного влияния. Например, в работе [25] показано, что нейтрализация ФГ 4-% раствором извести, положительно сказывается на физико-механических характеристиках ССЦ, а также способствует ускорению начала гидратации.

Щелочной активатор. Основным активатором, который используется для производства ССЦ является портландцементный клинкер [16, 17, 21–27] или товарный портландцемент [18, 19, 32, 34–37, 39, 40]. Также известны исследования по применению негашеной [39, 40] и гашеной извести [28, 31], а также клинкера высокобелитового сульфоалюминатного цемента [20]. Кроме того, в качестве щелочного активатора рассматривались некоторые техногенные продукты, содержащие в своем составе большое количество СаО, такие как стальной шлак [29, 30, 40] и карбидный шлак [38], а также красный шлак (твёрдые отходы процесса Байера, промышленного процесса обработки боксита для поставки оксида

алюминия как сырья для электролиза алюминия) сочетании с гидроксидом кальция [31].

Как уже отмечалось ранее, большое значение имеет количество щелочного активатора в системе. В частности, его чрезмерное количество может привести к растрескиванию цементного камня за счет интенсивного образования этtringита. При использовании низкоактивных шлаков, для интенсификации процессов гидратации, рекомендуется применять более сильные активаторы, поскольку они повышают рН порового раствора и, таким образом, способствуют его более активному растворению.

На основе собранной информации о составах суперсульфатированного цемента, была сформирована сводная таблица 1. Анализ приведённых в ней результатов позволяет сделать вывод, что наиболее часто в качестве алюмосиликатного сырья рассматривается доменный гранулированный шлак, в качестве сульфатного компонента – фосфогипс различных модификаций, а в качестве щелочного активатора – портландцементный клинкер.

Таблица 1

Вещественный состав известных суперсульфатированных цементов

Содержание (% масс) и вид алюмосиликатного компонента	Содержание (% масс) и вид сульфатного компонента	Содержание (% масс) и вид щелочного компонента	Содержание (% от массы основных компонентов) и вид добавки	Источник
79–84,5 % доменный гранулированный шлак	15 % природный гипс	0,5; 1; 3; 5 % портландцементный клинкер	1% по массе нанокремнезем, поликабоксилатный суперпластификатор	[16]
82; 84 % доменный г ранулированный шлак	15 % природный гипс	1; 3 % портландцементный клинкер	1; 3% по массе Нанокремнезем, суперсульфатированный нафталин	[17]
85 % доменный гранулированный шлак	10 % ангидрит, полученный обжигом природного гипса	5 % портландцемент	–	[18]
50 % доменный гранулированный шлак	46 % ангидрит, полученный обжигом природного гипса	4 % портландцемент	–	[19]
80 % доменный гранулированный шлак	15 % природный ангидрит	5 % клинкер высокобелитного сульфоалюминатного цемента	–	[20]
80 % доменный гранулированный шлак	15 % фосфогипс (дигидрат)	5 % портландцементный клинкер	–	[21]
82 % доменный гранулированный шлак	15 % фосфогипс (дигидрат, нейтрализованный известью)	3 % портландцементный клинкер	–	[22]

Содержание (% масс) и вид алумосиликатного компонента	Содержание (% масс) и вид сульфатного компонента	Содержание (% масс) и вид щелочного компонента	Содержание (% от массы основных компонентов) и вид добавки	Источник
80 % доменный гранулированный шлак	15 % фосфогипс (полугидрат)	5 % портландцементный клинкер	—	[23]
80 % доменный гранулированный шлак	15 % фосфогипс (дигидрат, полугидрат, ангидрит)	5 % портландцементный клинкер	—	[24]
81 % доменный гранулированный шлак	15 % фосфогипс (ангидрит, нейтрализованный известью дигидрат)	3 % портландцементный клинкер	1 % алюминатный цемент	[25]
85 % доменный гранулированный шлак	10 % фосфогипс (ангидрит)	5 % портландцементный клинкер	—	[15]
85 % доменный гранулированный шлак	15 % фосфогипс (ангидрит)	8 % от массы портландцементный клинкер	—	[26], [27]
70–95 % доменный гранулированный шлак	0–25 % фосфогипс (полугидрат)	5; 10 % гашеная известь	—	[28]
42,5–50 % доменный гранулированный шлак	45 % фосфогипс (полугидрат)	7,5–15 % стальной шлак 5 % портландцементный	—	[29]
45 % доменный гранулированный шлак	45 % фосфогипс (полугидрат)	10 % стальной шлак	1; 3; 5; 7; 9 % затравки эттрингита	[30]
68,5 % доменный гранулированный шлака	20 % десульфуризационный гипс (дигидрат)	10 % красный шлам 1,5 % гидроксид кальция	синтезированные методом спекания монокальцевые силикаты	[31]
75 % доменный гранулированный шлак	20 % десульфуризационный гипс (полугидрат)	5 % портландцемент	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1% глюконата натрия, тартрата натрия, цитрата натрия, лактата натрия	[32]
75 % доменный гранулированный шлак	20 % десульфуризационный гипс (полугидрат)	5 % портландцемент	1; 2 % лактата натрия	[33]
75 % доменный гранулированный шлак	15 % фосфогипс (ангидрит, полугидрат)	10 % портландцемент	замедлители схватывания 0,1 % бура 0,2 % винная кислота	[34]
65 % доменный гранулированный шлак + 10 % фосфатный шлак				
60; 70 % доменный гранулированный шлака 10; 20 % кислородно- конвертерного шлака	20 % десульфуризационный гипс	0,5–3 % (от основной массы) портландцемент	—	[35]

Содержание (% масс) и вид алумосиликатного компонента	Содержание (% масс) и вид сульфатного компонента	Содержание (% масс) и вид щелочного компонента	Содержание (% от массы основных компонентов) и вид добавки	Источник
77; 78; 79; 80 % доменный гранулированный шлак 5 % кварцевый порошок	10 % природный гипс	5 % портландцемент	0; 1; 2; 3 % нанокремнезем, нафталиновый суперплатификатор	[36]
60-80 % доменный гранулированный шлака 0-20 % метаколин	15 % ангидрит, полученный обжигом природного гипса	5 % портландцемент	–	[37]
67,5; 77,5 % ферроникелевый шлак	15; 25 % фосфогипс (полугидрат)	7,5 % карбидный шлак	–	[38]
70, 75 % вулканическая пемза	5, 10 % ангидрит как побочный продукт производства плавиковой кислоты	20 % негашеная известь	–	[39]
		20 % портландцемент		
65 % вулканическая пемза	15 % ангидрит как побочный продукт производства плавиковой кислоты	20 % негашеная известь	–	[40]

3. Свойства

Скорость гидратации и теплота выделения. Согласно требованиям стандарта EN 15743 [14] начало гидратации должно составлять более 75, 60 и 45 мин для классов прочности 32,5 Н, 42,5 Н и 52,5 Н соответственно. Зачастую начало схватывания ССЦ значительно длиннее чем у портландцемента и согласно исследованиям составляет от 1 до 10 часов [10, 23, 15].

Также, как и у портландцемента процесс гидратации суперсульфатированного цемента состоит из пяти периодов [10, 11].

I – прединдукционный – характеризуется растворением алюминатов и сульфатов из состава ССЦ в воде и ростом теплоты гидратации в данный период (2–3 ч);

II – индукционный – характеризуется формированием на поверхности шлака гидратной пленки из новообразований, снижением растворимости алюминатов из-за присутствия сульфатов, и, как следствие, резкого снижения тепловыделения (18–21 ч);

III – период ускоренного твердения – характеризуется ростом щелочности системы и разрушением поверхности шлака под действием OH^- , в следствии чего образуется большое количество активных SiO_2 и Al_2O_3 и, как следствие, ионов Al^{3+} и Si^+ , что в свою очередь приводит к образованию геля CSH и CAN , и под действием SO_4^{2-} этtringита (9–11 ч);

IV – период замедления – характеризуется ростом продуктов гидратации и уплотнением

структуры, при этом интенсивность гидратационного тепловыделения снижается (20–23 ч);

V – период стабилизации – характеризуется дальнейшим уплотнением структуры, что препятствует проникновению воды в глубь системы и участию ее в процессах гидратации, и приводит к медленному стабильному течению процесса гидратации (более 12 ч).

Особенности процесса гидратации суперсульфатированного цемента предопределяют более низкое общее количество выделяющейся теплоты, по сравнению с портландцементом [8, 9, 10].

Для ускорения начала схватывания рядом исследователей рассматривалось введение в состав ССЦ активаторов твердения таких как затравки этtringита [29], алумосиликатный цемент [25], нанокремнезем [16, 36].

Так, в частности, авторами [30] показано, что введение в систему, состоящую из ДГШ (45 %), стального шлака (45 %) и фосфогипса в форме дигидрата (10 %), затравок этtringита, синтезированных методом отдельных стадий зародышеобразования и старения, в количестве 1, 3, 5, 7, 9 %, способствует сокращению, как начала, так и конца схватывания. Например, введение 7% затравки AFt сократило время окончательного схватывания с 1625 минут до 1030 минут, при этом тепловыделение за 24 часа увеличилось на 648 % по сравнению с эталоном, что свидетельствует о положительном влиянии затравок на процессы гидратации. Если затравки

этtringита начинают влиять на скорость гидратации на ранних стадиях, то нанокремнезем проявляется себя на более поздних сроках твердения [16, 36].

Также на скорость гидратации и тепловыделение оказывает влияние удельная поверхность суперсульфатированного цемента. В исследовании [41], было установлено, что процесс гидратации ССЦ можно ускорить путем его измельчения. Увеличение удельной поверхности ССЦ с 300 м²/кг до 500 м²/кг способствует существенному сокращению времени индукционного периода и росту тепловыделения – с 75,76 Дж/г максимальное до 108,70 Дж/г, что свидетельствует об ускорении процесса гидратации.

Предел прочности при сжатии. Согласно литературным данным предел прочности при сжатии суперсульфатированного цементного камня лежит в широких пределах от 20 до 90 МПа. При этом, в начальный период твердения, ССЦ по сравнению с обычным портландцементом отличается более низким набором прочности, которая на 3 суток в среднем составляет порядка 5 МПа. Медленный набор прочности на ранних сроках (3–7 суток), в первую очередь обусловлен низкой реакционной способностью шлака по сравнению с клинкерными минералами. Однако к 28 суткам предел прочности ССЦ достигает значений портландцемента [10]. Ранее уже отмечались факторы влияющие на значение прочности ССЦ – вид алюмосиликатного сырья, его химический состав и удельная поверхность [16, 41]; вид и количество щелочного активатора; условия твердения (температура и влажность) [18].

Введение в состав затравок этtringита и нанокремнезема, положительно отражается не только на сроках схватывания, но и способствует росту прочности ССЦ [30, 36]. В частности, введение 1 %, 3 %, 5 %, 7 % и 9 % затравки AFt привело к росту прочности ССЦ в возрасте 3 суток с 0,6 МПа до 4,5 МПа, 7,6 МПа, 11,1 МПа, 15,7 МПа и 18,3 МПа соответственно. За 28 суток прочность увеличилась с 27,0 МПа до 38,9 МПа, 40,5 МПа, 45,1 МПа, 68,0 МПа и 68,7 МПа. Через 90 дней прочность возросла с 47 МПа до 63 МПа, 64 МПа, 62 МПа 88 МПа и 94 МПа соответственно [30]. Авторы [30] отмечают, что максимальный процентный прирост прочности наблюдается на 3 суток и со временем постепенно снижается.

При использовании в качестве активатора твердения нанокремнезема в количестве 1 %, 2 % и 3 %, имеет место аналогичная картина: максимальный прирост прочности наблюдается на первые сутки твердения и составляет 71 %, 600 % и 949 % соответственно. В тоже время через 90

дней прирост по сравнению с ССЦ без НК составил 35 %, 82 % и 106 % соответственно [36].

Стойкость в агрессивных средах. Суперсульфатированный цемент обладает более высокими показателями сульфатостойкости по сравнению с портландцементом [21, 23, 26, 32]. В первую очередь это обусловлено тем, что продукты гидратации портландцемента $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и алюминаты вступают во взаимодействия с ионами (SO_4^{2-}) агрессивной среды с образованием гипса и этtringита, расширение которых приводит к возникновению внутренних напряжений и растрескиванию цементного камня и, как следствие, снижению его механических характеристик. В тоже время ССЦ отличается низким содержанием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и высоким содержанием сульфатов и алюминатов, обеспечивающих контролируемое образование этtringита, что предотвращает отрицательное воздействие поступающих извне сульфат ионов. Также выявлено [23, 32], что суперсульфатированный цемент проявляет себя лучше при воздействии кислотно-сульфатной агрессивной среды ($\text{HCl}-\text{Na}_2\text{SO}_4$).

Так [23] установлено, что в портландцементе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вступает в реакцию с ионами H^+ и SO_4^{2-} с образованием определенного количества гипса, расширение которого приводит к растрескиванию и разрушению цементного камня. В тоже время, несмотря на то, что под воздействием комбинированной агрессивной среды в ССЦ этtringит разлагается, а CSH декальцинируется с образованием гипса, вызывая отслоение и повреждение, распределение пор по размерам у ССЦ оказывается более благоприятным, чем у портландцемента, и обеспечивает лучшую стойкость в условиях кислотно-сульфатной коррозии.

В тоже время суперсульфатированный цемент по сравнению с портландцементом отличаются более низкой стойкостью к воздействию сульфатов магния [26]. В первую очередь это связано со снижением pH среды под воздействием $\text{Mg}(\text{OH})_2$, что приводит к уменьшению образования этtringита и стимулированию декальцинации CSH с высвобождением $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В ходе этого процесса происходит полное замещения ионов Ca^+ ионами Mg^+ с образованием фаз M-S-H, которые отличаются низкими значениями механической прочности. При этом в цементующей матрице наблюдается увеличение количества гипса и брусита ($\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), вызывающих коагуляцию пор и замедляющих дальнейшую деструкцию. В системе ССЦ коррозионные процессы протекают более активно из-за низкого содержания портландита, что снижает образование брусита, выполняю-

щего роль коьматанта, замедляющего проникновение ионов магния запускающих процесс декальцинации CSH. При этом авторы [26] отмечают, что увеличение содержания активаторов твердения делает ССЦ ещё более восприимчивыми к данному виду коррозии.

Суперсульфатированные цементы, по сравнению с портландцементом, также имеют более высокие показатели стойкости к проникновению ионов хлора [27]. Это обусловлено тем, что матрица ССЦ состоящая в основном из ДГШ, отличающегося более низкой электропроводимостью по сравнению с портландцементных клинкером, предопределяет низкую степень проникновения хлорид-ионов. Авторы [27] отмечают, что глубина проникновения хлорной агрессивной среды на 90 % ниже чем у обычного портландцемента.

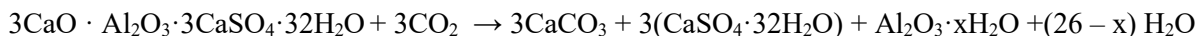
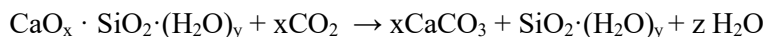
Морозостойкость. Суперсульфатированные цементы отличаются более низкими значениями по морозостойкости по сравнению с обычным портландцементом. Ряд исследователей придерживается мнения, что, в первую очередь, это связано с его восприимчивостью к карбонизации и образования CaCO_3 в виде нестабильного арагонита во время циклов попеременного замораживания оттаивания. Также высказывается предположение, что кристаллические фазы камня на основе ССЦ значительно различаются по коэффициенту расширения/сжатия при изменении температуры, что может привести к несоответствию объемов кристаллической и гелевой фаз при замораживании и оттаивании. Повысить морозостойкость ССЦ можно за счет уплотнения его структуры – уменьшения предельного размера пор и увеличения содержания микропор (<20 нм) [17, 33].

В работе [33, 34] установили возможность повышения плотности и, как следствие, морозостойкости суперсульфатированных цементов за счет введения в их состав слабых солей (лактат натрия (60 % раствор), глюконат натрия, тартрат

натрия и цитрат натрия). Принцип действия слабых солей базируется на динамическом регулировании pH порового пространства суперсульфатированного цемента – высокое значение pH на ранней стадии гидратации обеспечивает быстрое растворение шлака и гипса, однако, для дальнего устойчивого роста AfT по ходу реакции pH должен снижаться до определенного значения. Авторы [34] отмечают, что введение в состав ССЦ слабых солей, обеспечивает регулирование pH порового пространства, с образованием большего количества продуктов гидратации, что предопределяет снижение пористости системы и, как следствие, способствует повышению его морозостойкости.

В работе [17] показано, что введение в состав ССЦ нанокремнезема также способствует повышению его морозостойкости. За счет уменьшения соотношения капиллярных пор и пор воздухопроницаемости, обеспечивается формирование более оптимальной пористости системы, что обеспечивает снижение внутренних напряжений в ходе попеременного замораживания оттаивания.

Карбонизация. Одним из основных недостатков суперсульфатированного цемента является его склонности к быстрой карбонизации [22, 26, 31, 33]. Как указывалось ранее, щелочной компонент, входящий в состав ССЦ, способствует растворению шлака, увеличивая концентрацию ионов Ca^{2+} , Al^{3+} и SiO_4^{2-} , а гипс связывает ионы SiO_4^{2-} и Ca^{2+} в результате чего образуется этtringит и CSH. Однако расход щелочи на активацию шлака, снижает щелочность порового пространства камня, делая его более восприимчивым к карбонизации [33]. Из-за низкого содержания в ССЦ портландита pH гидратной системы находится в пределах 11,5–12,0 [9]. При таком значении pH продукты гидратации гель CSH и этtringит реагируют непосредственно с CO_2 . Для гелей CSH карбонизация представляет собой постепенный процесс декальцинации:



В итоге скорость процесса карбонизации ССЦ оказывается значительно выше чем у портландцемента. При карбонизации портландцемента наблюдается прирост прочности, в то время как у суперсульфатированного – снижение. Это обусловлено тем, что карбонизация продуктов гидратации ССЦ приводит к ухудшению его микроструктуры за счет уменьшения мольного объема твердого вещества и роста общей пористости системы [19].

В настоящее время существует два основных пути защиты суперсульфатированных цементов от карбонизации. Первый заключается в защите поверхности от внешнего воздействия путем нанесения различных покрытий; второй предполагает использование различных минеральных и химических добавок [16, 17, 32, 33, 36], которые оказывают положительное влияние на макроструктуру ССЦ снижая его проницаемость.

Выбросы CO₂. Как известно, источником CO₂ при производстве портландцемента являются сырьевые компоненты портландцементного клинкера (CaCO₃, MgCO₃ [10, 42–44]), а также топливо, затрачиваемое на процесс обжига и генерацию электроэнергии, используемой для помола сырья и конечного продукта, и другие технологические нужды.

В работе [10] приведен расчет, в котором сравниваются выбросы CO₂ при производстве портландцемента и суперсульфатированного цемента. Так авторы [10] отмечают, что общие выбросы углекислого на одну тонну портландцемента клинкера (P_{пц}) составляют ≈765,2 кг и рассчитывают исходя из суммы выбросов, образующихся при производстве клинкера (P_к) и при его помоле (P_п) (1):

$$P_{пц} = 95\% \cdot P_k + P_p = 0,95 \cdot (533,13 + 11,15 + 0,08 + 202,3 + 35,06) + 21,811 = 782,49 + 21,811 = 765,1765 \text{ кг CO}_2/\text{т}$$

Таблица 2

Выбросы CO₂ на 1 т портландцементного клинкера

Источник	Количество CO ₂ кг/на тонну цемента
Сырье	
Разложения карбонатных минералов	533,13
Сжигание органического углерода	11,15
Разложения цементной пыли	0,08
Топливо/энергия	
Электроэнергия на обжиг	35,06
Сжигание угля при обжиге	202,3
Электроэнергия на помол портландцементного клинкера	21,811

При этом выбросы CO₂ при производстве ССЦ будут представлять из себя сумму выбросов, образующихся в ходе производства порт-

ландцемента, с учетом его 5 % содержания в составе ССЦ и выбросов, образующихся при помоле ДГШ (P_{дгш}), которая с учетом его содержания в смеси 80 % составляет 28 кг CO₂/т :

$$P_{пц} = 5\% \cdot (P_k + P_p) + P_{дгш} = 0,05 \cdot (782,49 + 21,811) + 28 = 68,215 \text{ кг CO}_2/\text{т}$$

Необходимо отметить, что выбросы CO₂ при помоле 15% гипса не учитываются, что обусловлено его меньшей твердостью, и значительно более быстрым помолом в сравнении с портландцементным клинкером. Даже с учётом такого упрощения, из расчета видно, что выбросы углекислого газа при производстве суперсульфатированного цемента на 91 % ниже чем при производстве портландцемента. В совокупности с возможностью использования для производства ССЦ отходов, это делает данный вид цемента более предпочтительным с точки зрения экологии, рационального природопользования и энергосбережения, в соответствии с Приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

Выводы

1. Суперсульфатированный цемент благодаря тому, что он в значительной степени изготавливается из распространенных крупнотонажных техногенных отходов (шлак, фосфогипс и т.д.) соответствует технологическим приоритетам РФ и имеет перспективы внедрения в практику строительства, что делает разработки в области ССЦ крайне актуальными.

2. Если ранее к шлаку для его производства ССЦ предъявлялись требования по достаточно высокому минимальному содержанию оксида алюминия, то современные исследования подтверждают возможность получения ССЦ с высокими механическими характеристиками из шлака с содержанием оксида алюминия менее 10 %. Кроме того, доменный гранулированный шлак может быть частично или полностью заменён другими видами алюмосиликатного сырья, что обеспечивает существенное расширение сырьевой базы суперсульфатированного цемента и актуализирует перспективу дальнейших исследований, направленных на поиск новых нетрадиционных видов алюмосиликатного сырья природного и техногенного генезиса.

3. Большой практический интерес представляет перспективность использования гипсосодержащих отходов, в частности фосфогипса как наиболее крупнотонажного, в качестве сульфатного компонента для производства ССЦ. При этом, в отличие от природного гипсового сырья, фосфогипс отличается достаточно высокой изначальной дисперсностью, что позволяет снизить или исключить из общего баланса затраты на его

помол. Рядом исследований подтверждается, что использование фосфогипса позволяет получить физико-механические характеристики конечного продукта лучше, чем при использовании природного гипсосодержащего сырья. Однако, многочисленные исследования фосфогипса показали, что особенности организации технологического процесса получения ортофосфорной кислоты, побочным продуктом производства которого является ФГ, оказывают существенное значение на его текстурно-морфологические характеристики, химический состав и pH, варьирующийся в широких пределах от 3,5 до 12. В случае использования ФГ в качестве компонента ССЦ, данные факторы могут оказывать влияние на pH порового пространства, процессы гидратации и, как следствие, механические характеристики затвердевшего камня. Также необходимо отметить, что ангидрит полученный из фосфогипса, в зависимости от источника отхода, может обладать или не обладать способностью к самостоятельному твердению, что также может оказывать влияние на процессы структурообразования суперсульфатированного цемента, его прочность и стойкость в агрессивных средах. Изучение влияния фосфогипсов, взятых из различных источников, на свойства ССЦ, имеет большое практическое значение как с позиции выявления критических факторов, оказывающих это воздействие, так и с позиции оптимизации рецептурно-технологических параметров с учетом данных факторов.

4. К основным достоинствам бетонов на суперсульфатированных цементах можно отнести его высокую стойкость в условиях сульфатной (кроме сульфата магния) и хлоридной коррозии и низкую теплоту гидратации, что делает возможным использование таких бетонов в массивных морских, гидротехнических и очистных сооружениях. Также ССЦ, в сравнении с портландцементом, отличается меньшими (на 91 %) выбросами CO₂ при его производстве. Все это, в совокупности с возможностью использования в качестве сырья отходов, делает данный вид цемента более предпочтительным с точки зрения экологии, рационального природопользования и энергосбережения.

5. Основными недостатками суперсульфатированных цемента и бетонов на их основе является пониженная морозостойкость и высокая склонность к карбонизации. Основным принципами борьбы с этими недостатками является снижение проницаемости ССЦ путем повышения его плотности, за счет использования различных технологических приемов и введения различных видов химических добавок, способствующих повышению плотности системы. Так как в данном направлении было исследовано ограниченное

количество модификаторов (нанокремнезем, лактат натрия, глюконат натрия, тартрат натрия и цитрат натрия), актуальным является расширение номенклатуры данного вида добавок.

Источник финансирования. Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания на создание в 2021 году новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей национального проекта «Наука и университеты», по научной теме Разработка и развитие научно-технологических основ создания комплексной технологии переработки гипсосодержащих отходов различных промышленных предприятий и поиск новых способов применения продуктов переработки (FZWG-2024-0001), при административной поддержке Научно-образовательного центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК» (г. Белгород).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiang Q., Pan H., Ma X., Yang M., Lyu Y., Zhang X., Shui W., Liao W., Xiao Y., Wu J., Zhang Y., Xu M. Impacts of energy-saving and emission-reduction on sustainability of cement production // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 191. 114089. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114089.
2. Supriya, Chaudhury, R., Sharma, U., Thapliyal, P.C., Singh, L.P. Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector // Journal of Cleaner Production. 2023. 417. 137466. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137466
3. Rashad A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles // Journal of Cleaner Production. 2015. 87. 717–725. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.080
4. Miller S.A., Habert G., Myers R.J., Harvey J.T. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies // One Earth. 2021. 4(10). 1398–1411. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.09.011.
5. Потапова Е.Н., Гусева Т.В., Тихонова И.О., Канишев А.С., Кемп Р.Г. Производство цемента: аспекты повышения ресурсоэффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 15–20. DOI 10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20
6. Жадановский Б.В., Исафилов К.А., Ахмедов А.К. Прямые и косвенные энергозатраты при производстве бетонных и железобетонных изделий, конструкций и сооружений // Системные технологии. 2018. №1 (26). С. 118–120.
7. Madlool N.A., Saidur R., Rahim N.A., Kamalisarvestani M. An overview of energy savings measures for cement industries // Renewable and

Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 19. Pp. 18–29. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.046.

8. Juenger M.C.G., Winnefeld F., Provis J.L., Ideker J.H. Advances in alternative cementitious binders // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41(12). Pp. 1232–1243. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012.

9. Gruskovnjak A., Lothenbach B., Winnefeld F., Figi R., Ko S.-C., Adler M., Mäder U. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement // *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38(7). Pp. 983–992. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.03.004

10. Wu Q., Xue Q., Yu Z. Research status of super sulfate cement // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 294. 126228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126228

11. Yazıcı H., Yardımcı M. Y., Yiğiter H., Aydın S., Türkel S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag // *Cement and Concrete Composites*. 2010. Vol. 32(8). Pp. 639–648. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005.

12. Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Бурьянов А.Ф. Использование фосфогипса как сырья для производства многокомпонентных вяжущих и сульфоалюминатных цементов // *Региональная архитектора и строительство*. 2024. №2 (59). С. 30–46. DOI: 10.54734/20722958_2024_2_30

13. Kühl H. Verfahren zur Herstellung von Zement aus Hochofenschlacke, German Patent No. 237777, December 23, 1908.

14. EN 15743, Supersulfated cement-composition, specification and conformity criteria, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2010.

15. Erdem E., Ölmez H. The mechanical properties of supersulphated cement containing phosphogypsum // *Cement and Concrete Research*. 1993. Vol. 23, Iss. 1. Pp. 115–121. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90141-U

16. Cai T., Hou P., Chen H., Zhao P., Du P., Wang S., Zhou X., Wang X., Cheng X. Effects of nanosilica on supersulfated cements of different clinker-activation degree // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 365. 130118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130118

17. Wang R., Li B., Chen H., Li Q., Huang Y., Zhao P., Tchakouté H.K., Mapesu P., Hou P., Cheng X. Improving the frost-resistance performance of supersulfated cement by reducing the crystalline-to-gel ratio through the addition of nano-SiO₂ // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 424. 135872. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135872

18. Angulski da Luz C., Hooton R.D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age // *Cement and*

Concrete Research. 2015. Vol. 77. Pp. 69–75. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.07.002.

19. Xie Y., Sun T., Shui Z., Ding C., Li W. The impact of carbonation at different CO₂ concentrations on the microstructure of phosphogypsum-based supersulfated cement paste // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 340. 127823. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127823

20. Sun Z., Nie S., Zhou J., Li H., Chen Z., Xu M., Mu R., Wang Y. Hydration mechanism of calcium sulfoaluminate-activated supersulfated cement // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 333. 130094. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130094

21. Wang L., Gao Z., Gao F., Li X., Chang S., Liu S. Comparing study on the evolution characteristics of performance and microstructure between Portland slag cement and supersulfated cement under chemical attacks // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 425. 135969. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135969

22. Yu B., Fang Z., Gao Y., Yang W., Wang C., Zhou S. Carbonation of supersulfated cement concrete after 8 years of natural exposure // *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 142. 105165. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105165

23. Chang S., Gao F., Wang L., Jin Q., Liu S., Wan L. Deterioration mechanism of supersulfated cement paste exposed to sulfate attack and combined acid-sulfate attack, *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 414. 134978. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134978

24. Liu S., Ouyang J., Ren J. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement // *Construction and Building Materials*, 2020. Vol. 243. 118226. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118226

25. Liu S., Wang L., Yu B. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement // *Construction and Building Materials*, 2019. Vol. 214. Pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052

26. Pinto S.R., Angulski da Luz C., Munhoz G.S., Medeiros-Junior R.A. Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 136. 106172. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106172

27. Pinto S.R., Angulski da Luz C., Munhoz G.S., Medeiros-Junior R.A. Resistance of phosphogypsum-based supersulfated cement to carbonation and chloride ingress // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 263. 120640. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120640

28. Liao Y., Yao J., Deng F., Li H., Wang K., Tang S. Hydration behavior and strength development of supersulfated cement prepared by calcined phosphogypsum and slaked lime // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. 108075. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.108075
29. Ouyang G., Li Z., Sun T., Ye Z., Deng Y., Li W. Greener phosphogypsum-based all-solid-waste cementitious binder with steel slag activation: Hydration, mechanical properties and durability // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 443. 140996. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140996
30. Li M., Deng X., Jian S., Huang J., He X., Yang J., Tan H. Effects of ettringite seed on the hydration and properties of supersulphated phosphogypsum-slag cement // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 452. 142105. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142105
31. Wang J., Li X., Sun R., Zhao Y., Gong F., Huang T., Liu Z., Wang D. Early-age carbonation mitigation of SSC by CxS minerals: Mechanism and Performances // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 430. 136391. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136391
32. Xing J., Zhou Y., Peng Z., Wang J., Jin Y., Jin M. The influence of different kinds of weak acid salts on the macro-performance, micro-structure, and hydration mechanism of the supersulfated cement // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 66. 105937. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.105937
33. Peng Z., Zhou Y., Wang J., Chen L., Miao C. The impediment and promotion effects and mechanisms of lactates on the hydration of supersulfated cements - Aiming at a performance enhancement // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 341. 130751. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130751
34. Singh M., Garg M. Calcium sulfate hemihydrate activated low heat sulfate resistant cement // *Construction and Building Materials*. 2002. Vol. 16(3). Pp. 181–186. DOI: 10.1016/S0950-0618(01)00026-5
35. Chen W., Li Y., Zhou Y., Xu C., Xiong C., Deng J., Xing J., Xiao S., Jin Y. Impact of basic oxygen furnace slag on the hydration microstructure, mechanical properties, and carbon emissions of supersulfated cement // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 432. 136673. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136673
36. Li B., Hou P., Chen H., Zhao P., Du P., Wang S., Cheng X. GGBS hydration acceleration evidence in supersulfated cement by nanoSiO₂ // *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 132. 104609. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104609
37. Pimenta S., Angulski da Luz C., Pelisser F. The use of metakaolin as a source of alumina in supersulfated in cements order to increase the formation of ettringite // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. Pp. 3301–3309. DOI: 10.1007/s10973-023-12005-7
38. Wang Y., Hu Y., He X., Su Y., Strnadel B., Miao W. Hydration and compressive strength of supersulfated cement with low-activity high alumina ferronickel slag // *Cement and Concrete Composites*, 2023. Vol. 136. 104892. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104892
39. Cabrera-Luna K., Perez-Cortes P., Escalante Garcia J.I. Influence of quicklime and Portland cement, as alkaline activators, on the reaction products of supersulfated cements based on pumice // *Cement and Concrete Composites*. 2024. Vol. 146. 105379. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105379
40. Cabrera-Luna K., Perez-Cortes P., Garcia J. I.E. Pumice-based supersulfated cements in mortars: Effects of pumice fineness and activator ratio on physical and environmental characteristics // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 342. Part A. 127947. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127947
41. Liu S., Wang L., Gao Y., Yu B., Tang W. Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement // *Thermochimica Acta*. 2015. Vol. 605. Pp. 37–42. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.013
42. Ke J., McNeil M., Price L., Khanna N. Z., Zhou N. Estimation of CO₂ emissions from China's cement production: Methodologies and uncertainties // *Energy Policy*. 2013. Vol. 57. Pp. 172–181. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.01.028
43. Anand S., Vrat P., Dahiya R.P. Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry // *Journal of Environmental Management*. 2006. Vol. 79 (4). Pp. 383–398. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.08.007
44. Gao T., Shen L., Shen M., Chen F., Liu L., Gao L. Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 103. Pp. 160–170. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.026

Информация об авторах

Алфимова Наталия Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: alfimovan@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46.

Левицкая Ксения Михайловна, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: levickayalevickaya@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Россия, 308012. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85.

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

Бухтияров Илья Юрьевич, студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: gertakitry@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46. Лаборант-исследователь лаборатории перспективных материалов и технологий. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Поступила 26.05.2024 г.

© Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Елистраткин М.Ю., Бухтияров И.Ю., 2024

^{1,*}Alfimova N.I., ^{1,2}Levickaya, ¹Elistratkin M.Yu., ^{1,2}Bukhtiyarov I.Yu.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

²Belgorod National Research University

*E-mail: alfimovan@mail.ru

SUPERSULFATED CEMENTS: A REVIEW ANALYSIS OF THE FEATURES OF PROPERTIES, RAW MATERIALS, PRODUCTION AND APPLICATION PROSPECTS

Abstract. Currently, research aimed at developing alternative binders that can partially or completely replace Portland cement is relevant. At the same time, the priorities are minimal impact on the environment (including dust and CO₂ emissions), energy saving, and rational use of natural resources through the disposal of man-made waste. Extremely promising from these positions are supersulfated cements (SSC), which consist of 80–85 % of the aluminosilicate component; 10–20 % from the sulfate component and 3–5 % alkaline activator. The traditional aluminosilicate component for SSC is granulated blast furnace slag (BFS), however, due to the removal of requirements for the content of aluminum oxide in its composition (not lower than 14 %), it has become possible to partially or completely replace it with other technogenic or natural aluminosilicate products. Instead of natural gypsum-containing raw materials, technogenic ones (phosphogypsum, desulfurization gypsum) are increasingly being considered as a sulfate component, both in the form of dihydrate and in the form of anhydrite and hemihydrate. Due to this composition and the possibility of using waste as the main components, this type of cement is characterized by significantly lower CO₂ emissions into the environment and energy costs for production compared to Portland cement. The article describes the features of the hydration mechanism of SSC, which determine its main properties: low heat generation, high resistance in sulfate and chlorine environments, acid resistance. Disadvantages are considered - long hardening times, reduced frost resistance, high carbonization rates. Ways to combat the shortcomings of SSC and prospects for further research are described.

Keywords: supersulfated cement, granulated blast furnace slag, phosphogypsum, alkaline activator, carbonization

REFERENCES

1. Xiang Q., Pan H., Ma X., Yang M., Lyu Y., Zhang X., Shui W., Liao W., Xiao Y., Wu J., Zhang Y., Xu M. Impacts of energy-saving and emission-reduction on sustainability of cement production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 191. 114089. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114089.
2. Supriya, Chaudhury, R., Sharma, U., Thapliyal, P.C., Singh, L.P. Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector. Journal of Cleaner Production. 2023. 417. 137466. DOI:

10.1016/j.jclepro.2023.137466

3. Rashad A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles. Journal of Cleaner Production. 2015. 87. 717–725. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.09.080
4. Miller S.A., Habert G., Myers R.J., Harvey J.T. Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. One Earth. 2021. 4(10). 1398–1411. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.09.011.

5. Potapova E.N., Guseva T.V., Tikhonova I.O., Kanishev A.S., Kemp R.G. Cement production: aspects of increasing resource efficiency and reducing negative impacts on the environment [Proizvodstvo cementa: aspekty povysheniya resursoeffektivnosti i snizheniya negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu]. *Construction Materials*. 2020. No. 9. Pp. 15–20. DOI 10.31659/0585-430X-2020-784-9-15-20 (rus)
6. Zhadanovsky B.V., Israfilov K.A., Akhmedov A.K. Direct and indirect energy consumption in the production of concrete and reinforced concrete products, structures and structures [Pryamye i kosvennye energozatraty pri proizvodstve betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij, konstrukcij i sooruzhenij]. *System technologies*. 2018. No. 1 (26). Pp. 118–120. (rus)
7. Madloul N.A., Saidur R., Rahim N.A., Kamalisarvestani M. An overview of energy savings measures for cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 19. Pp. 18–29. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.046.
8. Juenger M.C.G., Winnefeld F., Provis J.L., Ideker J.H. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41(12). Pp. 1232–1243. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012.
9. Gruskovnjak A., Lothenbach B., Winnefeld F., Figi R., Ko S.-C., Adler M., Mäder U. Hydration mechanisms of super sulphated slag cement. *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38(7). Pp. 983–992. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.03.004
10. Wu Q., Xue Q., Yu Z. Research status of super sulfate cement. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 294. 126228. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126228
11. Yazıcı H., Yardımcı M. Y., Yiğiter H., Aydın S., Türkel S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2010. Vol. 32(8). Pp. 639–648. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005.
12. Alfimova N.I., Levitskaya K.M., Buryanov A.F. The use of phosphogypsum as a raw material for the production of multicomponent binders and sulfoaluminate cements [Ispol'zovanie fosfogipsa kak syr'ya dlya proizvodstva mnogokomponentnyh vyazhushchih i sul'foalyuminatnyh cementov]. *Regional Architect and Construction*. 2024. No. 2 (59). Pp. 30–46. DOI: 10.54734/20722958_2024_2_30
13. Kühl H. Verfahren zur Herstellung von Zement aus Hochofenschlacke, German Patent No. 237777, December 23, 1908.
14. EN 15743, Supersulfated cement-composition, specification and conformity criteria, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2010.
15. Erdem E., Ölmez H. The mechanical properties of supersulphated cement containing phosphogypsum. *Cement and Concrete Research*. 1993. Vol. 23, Issue 1. Pp. 115–121. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90141-U
16. Cai T., Hou P., Chen H., Zhao P., Du P., Wang S., Zhou X., Wang X., Cheng X. Effects of nanosilica on supersulfated cements of different clinker-activation degree. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 365. 130118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130118
17. Wang R., Li B., Chen H., Li Q., Huang Y., Zhao P., Tchakouté H.K., Mapesu P., Hou P., Cheng X. Improving the frost-resistance performance of supersulfated cement by reducing the crystalline-to-gel ratio through the addition of nano-SiO₂. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 424. 135872. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135872
18. Angulski da Luz C., Hooton R.D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 77. Pp. 69–75. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.07.002.
19. Xie Y., Sun T., Shui Z., Ding C., Li W. The impact of carbonation at different CO₂ concentrations on the microstructure of phosphogypsum-based supersulfated cement paste. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 340. 127823. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127823
20. Sun Z., Nie S., Zhou J., Li H., Chen Z., Xu M., Mu R., Wang Y. Hydration mechanism of calcium sulfoaluminate-activated supersulfated cement. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 333. 130094. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130094
21. Wang L., Gao Z., Gao F., Li X., Chang S., Liu S. Comparing study on the evolution characteristics of performance and microstructure between Portland slag cement and supersulfated cement under chemical attacks. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 425. 135969. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135969
22. Yu B., Fang Z., Gao Y., Yang W., Wang C., Zhou S. Carbonation of supersulfated cement concrete after 8 years of natural exposure. *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 142. 105165. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105165
23. Chang S., Gao F., Wang L., Jin Q., Liu S., Wan L. Deterioration mechanism of supersulfated cement paste exposed to sulfate attack and combined acid-sulfate attack. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 414. 134978. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134978
24. Liu S., Ouyang J., Ren J. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-

based supersulfated cement. *Construction and Building Materials*, 2020. Vol.243. 118226. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118226

25. Liu S., Wang L., Yu B. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement. *Construction and Building Materials*, 2019. Vol. 214. Pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052

26. Pinto S.R., Angulski da Luz C., Munhoz G.S., Medeiros-Junior R.A. Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate. *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 136. 106172. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106172

27. Pinto S.R., Angulski da Luz C., Munhoz G.S., Medeiros-Junior R.A. Resistance of phosphogypsum-based supersulfated cement to carbonation and chloride ingress. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 263. 120640. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120640

28. Liao Y., Yao J., Deng F., Li H., Wang K., Tang S. Hydration behavior and strength development of supersulfated cement prepared by calcined phosphogypsum and slaked lime. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. 108075. DOI: 10.1016/j.jobeb.2023.108075

29. Ouyang G., Li Z., Sun T., Ye Z., Deng Y., Li W. Greener phosphogypsum-based all-solid-waste cementitious binder with steel slag activation: Hydration, mechanical properties and durability. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 443. 140996. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140996

30. Li M., Deng X., Jian S., Huang J., He X., Yang J., Tan H. Effects of ettringite seed on the hydration and properties of supersulphated phosphogypsum-slag cement. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 452. 142105. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142105

31. Wang J., Li X., Sun R., Zhao Y., Gong F., Huang T., Liu Z., Wang D. Early-age carbonation mitigation of SSC by CxS minerals: Mechanism and Performances. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 430. 136391. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136391

32. Xing J., Zhou Y., Peng Z., Wang J., Jin Y., Jin M. The influence of different kinds of weak acid salts on the macro-performance, micro-structure, and hydration mechanism of the supersulfated cement. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 66. 105937. DOI: 10.1016/j.jobeb.2023.105937

33. Peng Z., Zhou Y., Wang J., Chen L., Miao C. The impediment and promotion effects and mechanisms of lactates on the hydration of supersulfated cements - Aiming at a performance enhancement. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 341. 130751. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130751

34. Singh M., Garg M. Calcium sulfate hemihydrate activated low heat sulfate resistant cement. *Construction and Building Materials*. 2002. Vol. 16(3). Pp. 181–186. DOI: 10.1016/S0950-0618(01)00026-5

35. Chen W., Li Y., Zhou Y., Xu C., Xiong C., Deng J., Xing J., Xiao S., Jin Y. Impact of basic oxygen furnace slag on the hydration microstructure, mechanical properties, and carbon emissions of supersulfated cement. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 432. 136673. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136673

36. Li B., Hou P., Chen H., Zhao P., Du P., Wang S., Cheng X. GGBS hydration acceleration evidence in supersulfated cement by nanoSiO₂. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 132. 104609. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104609

37. Pimenta S., Angulski da Luz C., Pelisser F. The use of metakaolin as a source of alumina in supersulfated in cements order to increase the formation of ettringite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. Pp. 3301–3309. DOI: 10.1007/s10973-023-12005-7

38. Wang Y., Hu Y., He X., Su Y., Strnadel B., Miao W. Hydration and compressive strength of supersulfated cement with low-activity high alumina ferronickel slag. *Cement and Concrete Composites*, 2023. Vol. 136. 104892. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104892

39. Cabrera-Luna K., Perez-Cortes P., Escalante Garcia J.I. Influence of quicklime and Portland cement, as alkaline activators, on the reaction products of supersulfated cements based on pumice. *Cement and Concrete Composites*. 2024. Vol. 146. 105379. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105379

40. Cabrera-Luna K., Perez-Cortes P., Garcia J. I.E. Pumice-based supersulfated cements in mortars: Effects of pumice fineness and activator ratio on physical and environmental characteristics. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 342. Part A. 127947. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127947

41. Liu S., Wang L., Gao Y., Yu B., Tang W. Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement. *Thermochimica Acta*. 2015. Vol. 605. Pp. 37–42. DOI: 10.1016/j.tca.2015.02.013

42. Ke J., McNeil M., Price L., Khanna N. Z., Zhou N. Estimation of CO₂ emissions from China's cement production: Methodologies and uncertainties. *Energy Policy*. 2013. Vol. 57. Pp. 172–181. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.01.028

43. Anand S., Vrat P., Dahiya R.P. Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry. *Journal of Environmental Management*. 2006. Vol. 79 (4). Pp. 383–398. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.08.007

44. Gao T., Shen L., Shen M., Chen F., Liu L., Gao L. Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants. *Journal of Cleaner Production*. 2015.

Vol. 103. Pp. 160–170. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.026

Information about the author

Alfimova, Nataliya I. PhD, Associate professor. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Levickaya, Kseniya M. Graduate student. E-mail: levickayalevickaya@gmail.com, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov 308012, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46. Junior research associate Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, 85 Pobedy Str., 308015 Belgorod, Russia Russian Federation)

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

Bukhtiyarov, Ilya Yu. Student. E-mail: gertakity@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia. Laboratory assistant. Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, 85 Pobedy Str., 308015 Belgorod, Russia Russian Federation).

Received 26.05.2024

Для цитирования:

Алфимова Н.И., Левицкая К.М., Елистраткин М.Ю., Бухтияров И.Ю. Суперсульфатированные цементы: обзорный анализ особенностей свойств, сырья, перспектив производства и применения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 8–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-8-24

For citation:

Alfimova N.I., Levickaya K.M., Elistratkin M.Yu., Bukhtiyarov I.Yu. Supersulfated cements: a review analysis of the features of properties, raw materials, production and application prospects. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 7. Pp. 8–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-8-24

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-25-34

*Сидорова А.С.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail Sidorovaas96@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОБАВКИ ПЕРЛИТА КАК ЭЛЕМЕНТА ВНУТРЕННЕГО УХОДА В СИСТЕМЕ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. На современном этапе развития материаловедения существует большое количество способов снижения усадочных деформаций в системах цементных композитов. Однако далеко не каждый из этих способов можно отнести к категории надежных, способных в любых условиях обеспечить эффект безусадочности. Особенно актуальной данная проблема становится, когда речь идет о бетонах и растворах, которые предназначены для производства работ в сложных условиях, например, ремонтные составы.

Проанализированы основные способы ухода за свежесформованным бетоном, обосновано введение перлитового песка в качестве агента внутреннего ухода для снижения усадки при изготовлении ремонтных растворов. Описана методика измерения усадки при помощи измерительного комплекса ТЕРЕМ 4.0.

Рассмотрено влияние замещения части мелкого заполнителя (кварцевого песка) легким заполнителем (перлитовым песком). Получены графики зависимостей величины усадки при разном содержании перлитового песка и в условиях низкой и повышенной влажности окружающей среды. Установлено, что введение в состав цементно-песчаного раствора перлита мелкой фракции, как замену части песка, в количестве не более 5 % по объему является эффективным способом снижения усадочных деформаций в сухих условиях твердения ($\phi \leq 40\%$).

Ключевые слова: цементный камень, легкий заполнитель, перлит, внутренний уход, усадочные деформации.

Введение. Возникновение дефектов в строительных конструкциях может быть связано со множеством причин: ошибки при проектировании, нарушение правил производства работ, несоблюдение условий эксплуатации зданий и сооружений, ошибки при проведении реконструкций и пр. В случаях разрушения конструкций, вызванных преждевременным износом, становятся актуальны вопросы ремонта строительных объектов для продления сроков их эксплуатации.

Проведение ремонтных работ, как правило, осуществляется в гораздо более сложных условиях, чем возведение монолитных конструкций на строительной площадке или производство бетонных композитов в заводских условиях. Наряду с обеспечением таких характеристик как хорошая удобоукладываемость при низком водоцементном отношении, высокая адгезия к основанию и быстрый набор прочности крайне важно достичь показателя низкой усадки. В рамках настоящего исследования рассматриваются вопросы снижения усадочных деформаций бетонов, предназначенных для проведения ремонтных работ.

Возникновение усадки, которая приводит к уменьшению объема цементного камня, является одной из основных причин трещинообразования в бетонных конструкциях [1]. Величина усадки свежесушеного и твердеющего бетона связана с различными факторами:

- изменением распределения, перемещением и испарением влаги – влажностная усадка
- уменьшением объема продуктов реакции гидратации по сравнению с объемом исходных материалов – контракционная усадка [2];
- карбонизацией гидроксида кальция, развивающейся с поверхности бетона вглубь – карбонизационная усадка [1].

Контракционная усадка развивается в период твердения цементного камня и в большей степени способствует изменениям в поровой структуре материала. Влажностная и карбонизационная усадки происходят уже в затвердевшем бетоне [2]. Обычно около 70 % общей усадки происходит в возрасте до семи дней, оставшиеся 30 % – к моменту достижения года.

На данный момент существует большое количество исследований, направленных на поиски способов компенсации и предотвращения усадочных деформаций [3–6].

Основные методы снижения усадки:

1. Применение расширяющих добавок сульфаталюминатного типа. Расширение бетона в данном случае происходит за счет образования гидросульфаталюмината кальция высокосульфатной формы (эттрингит), который возникает в процессе гидратации алюминатов кальция в присутствии сульфат-ионов. При этом важно подчеркнуть, что стабильный рост кристаллов эттрингита в ранний период твердения бетона возможен только в условиях надлежащего

влажностного ухода [7]. Нарушение технологии может привести к отсутствию эффекта расширения, а в некоторых случаях создаст условия для отложенного формирования этtringита [8] и развитию коррозии III вида, что станет причиной трещинообразования.

2. Введение высокомодульных волокон фибры позволяет улучшить параметры структуры, увеличить прочность бетона даже при неблагоприятных условиях твердения. Необходимо отметить, что данный способ направлен именно на сдерживание возникающих в затвердевших бетонах и растворах напряжений, а не на устранение причин их появления.

3. Снижение расхода портландцемента так же позитивно сказывается на снижении усадочных деформаций, т.к. в бетоне изменяется соотношение «цементный камень-заполнитель», соответственно снижается доля цементного камня в общем объеме бетона.

4. Обеспечение надлежащего ухода за бетоном, который позволит в значительной степени снизить влажностную усадку, а в некоторых случаях и вовсе её исключить.

Особый интерес при проектировании ремонтного состава представляет именно способ обеспечения надлежащего ухода, как один из наиболее эффективных с точки зрения предотвращения возникновения напряжений, вызванных миграцией влаги из твердеющего раствора.

Большинство из традиционных приемов базируется на внешних методах ухода, которые подразделяются на водные и безводные (рис. 1).

Производство ремонтных работ часто сопровождается перепадами температуры и влажности

окружающей среды, а осуществление надлежащего внешнего ухода не только не всегда экономически целесообразно, но и, порой, технически невозможно. Концепция внутреннего ухода значительно отличается от концепции внешнего ухода [10]. Внутренний уход может осуществляться путем введения компонентов, выступающих в роли дополнительных резервуаров с влагой, которая в процессе формирования гидратных образований будет вытягиваться под воздействием капиллярных сил в более мелкие поры цементного камня. Принципиальная разница между концепциями внутреннего и внешнего ухода представлена на рис. 2. В качестве агентов внутреннего ухода могут выступать, например, водонасыщенные легкие заполнители или суперабсорбенты [11].

При безводном уходе применяются различные приемы, которые способствуют предотвращению испарения влаги из толщи бетона:

- Синтетические покрытия применяются для укрытия поверхности конструкции паронепроницаемым материалом.
- В качестве мембран используются эмульсии, которые наносятся на бетон методом распыления и после застывания образуют защитный слой [12].
- Водорастворимые химические соединения, имеющие гидроксильные и эфирные функциональные группы, способствуют улучшению удержания влаги в бетоне и активизации процессов гидратации. Образующиеся водородные связи между этими группами помогают снизить паропроницаемость и уменьшить испарение воды [10].

Уход за бетоном

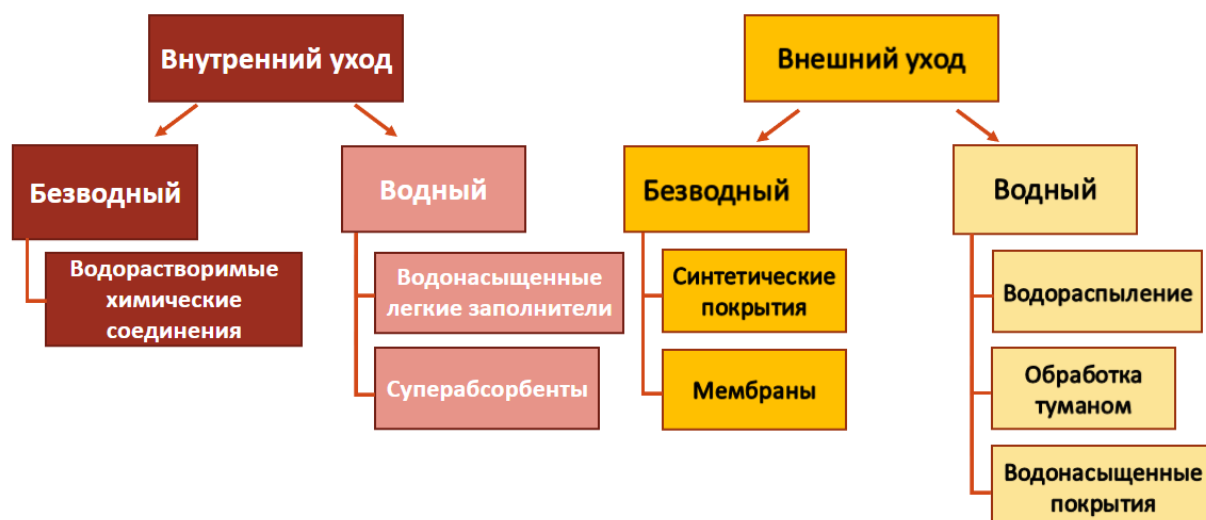


Рис. 1. Классификация методов ухода за бетоном от международного комитета RILEM [9]

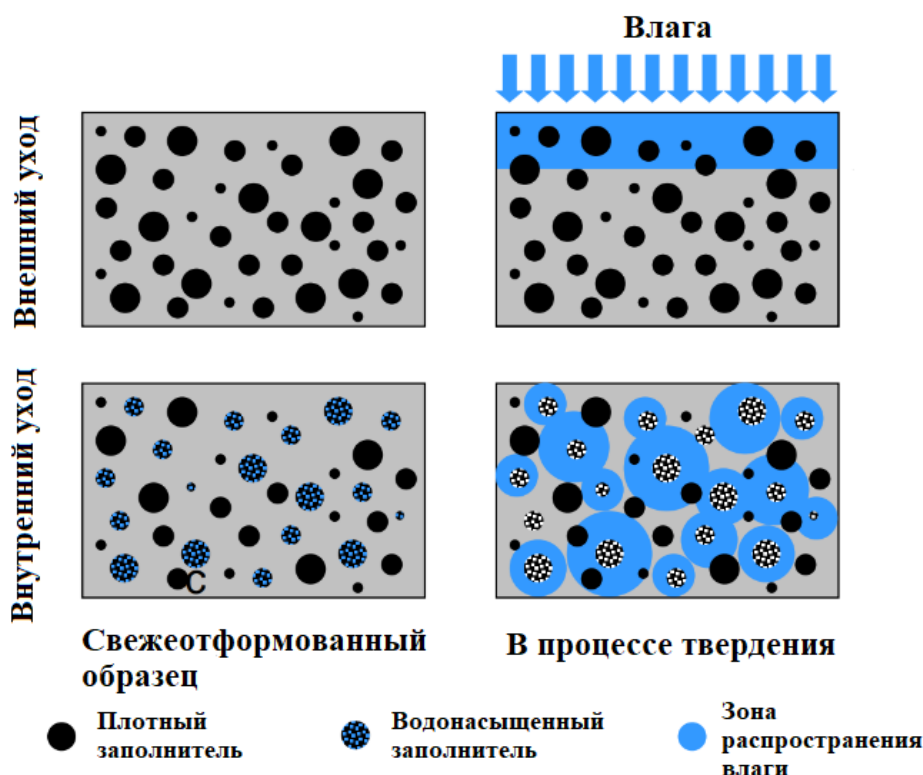


Рис. 2. Механизм распространения влаги при внешнем и внутреннем уходе [13]

Современные зарубежные исследования рассматривают использование концепции внутреннего ухода как эффективный способ борьбы с возникновением аутогенной усадки. Под данным термином понимают «уменьшение макроскопического объема бетона, вызванное контракционной усадкой и самовысушиванием вследствие непрерывной гидратации цементного теста в среде с постоянной температурой и влажностью» [14]. Считается, что аутогенная усадка развивается в высокопрочных цементных бетонах с низким водоцементным отношением (менее 0,4). Благодаря более плотной структуре таких композитов и отсутствию большого количества капиллярных пор влагообмен с окружающей средой не столь значительно влияет на процессы развития усадки. Малое количество воды в системе и повышенный расход цемента приводят к тому, что межпоровое пространство цементного камня буквально обезвоживается (самовысушивается) в процессе гидратации. Это вызывает формирование тонкой пористости и появление менисков, которые оказывают высокие сжимающие напряжения на стенки пор, что приводит к появлению трещин. Несмотря на важность тепловлажностного ухода за свежесуложенным бетоном, внешний уход не способствует снижению аутогенной усадки. Более эффективным способом снижения усадочных деформаций в данном случае считается применение методов внутреннего ухода.

Данные методы могут быть также эффективны при условиях, когда реализация внешнего

ухода затруднена или невозможна из-за крайне сжатых сроков проведения работ, например, при осуществлении противоаварийных мероприятий.

Цель данного исследования состоит в оценке степени влияния замещения мелкого заполнителя вспученным перлитом в разных дозировках на величину усадки при различной влажности среды твердения бетонных образцов.

Материалы и методы. В качестве агента внутреннего ухода для максимально равномерного распределения этого компонента по всему объему композита было принято решение использовать мелкодисперсный легкий заполнитель – вспученный перлитовый песок марки М-75. Так как вспученный перлит вводился в состав мелкозернистого бетона (т.е. крупность зерен заполнителя – не более 5 мм), применялся перлитовый песок группы ВПС (классификация в соответствии с ГОСТ 10832-2009).

Вспученный перлит – пористый материал, получаемый термической обработкой дробленых вулканических водосодержащих пород. В строительстве данный материал применяется, как правило, для изготовления сборных железобетонных конструкций, теплоизоляционных легких бетонов и штукатурных растворов, перлитобетонного утеплителя и пр. [15, 16]. Вспученный перлит характеризуется высоким коэффициентом водопоглощения за счет своей высокопористой структуры и большой открытой поверхности [17], поэтому в данном

случае его применение требует дополнительной обработки гидрофобизаторами. В рамках текущего эксперимента высокое водопоглощение перлитовых зерен, которое возрастает с уменьшением крупности гранул и объемного насыпного веса, играет положительную роль. Для вспученного перлита характерна высокая скорость водопоглощения: за первые 15 минут нахождения в водной среде перлит способен поглотить 80–90 % от общего объема воды, которое он может поглотить [18].

В соответствии с гипотезой, в процессе перемешивания сухие мелкодисперсные зерна перлитового песка впитают часть воды затворения, и за счет этого будет сформирован более прочный контактный слой на поверхности раздела фаз «цементный камень – пористый заполнитель» [19]. В дальнейшем, уже в процессе твердения, более мелкие поры цементного камня будут вытягивать поглощенную ранее влагу из более крупных пор заполнителя, компенсируя таким образом в теле бетона ту воду, что будет испаряться в условиях невысокой влажности окружающей среды.

Обзоры исследований применения вспученного перлита при производстве бетона позволяют выделить следующие преимущества данного материала: повышается подвижность бетонной смеси, снижаются плотность, аутогенная и влажностная усадки, повышается устойчивость к растворам Na_2SO_4 , снижается теплопроводность, повышается огнестойкость и звукоизоляционные свойства [20]. К недостаткам вспученного перлита можно отнести: снижение прочности при сжатии, повышение водопоглощения и пористости композитов, а также снижение устойчивости к растворам HCl . Мелкие частицы перлита обладают высокой реакционной способностью при взаимодействии с цементом в щелочной среде и могут быть использованы в качестве добавки для улучшения свойств бетона, в частности наблюдается повышение коэффициента трещиностойкости [21].

В ходе эксперимента были изготовлены образцы-балочки из цементно-песчаного раствора (1:2) размерами $4 \times 4 \times 16$ см. Перлитовый песок добавлялся путем замещения части кварцевого песка в дозировках 5–20 % по объему с

шагом 5 %. Также был изготовлен контрольный состав без добавления перлита. Водоцементное отношение $\text{В/Ц} = 0,45$ сохранялось неизменным во всех 5 составах. В табл. 1 представлены результаты проведения испытаний на распыл кольца цементно-песчаных растворов. Как видно из представленных данных, при увеличении доли перлита в составе снижение удобоукладываемости растворной смеси не наблюдалось, несмотря на высокую сорбционную способность перлитовых зерен. Можно предположить, что из-за значительной разницы в плотности ($\rho_{\text{песок}} = 1650 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{перлит}} = 44 \text{ кг/м}^3$) количество воды затворения, которое идет на смачивание поверхности кратно большего количества зерен песка, примерно равно количеству воды, которое идет на смачивание поверхности зерен перлита, а также поглощается им в процессе перемешивания смеси.

Стандартные методы измерения усадки предполагают изготовление и хранение образцов по ГОСТ 10180-2012, при этом «все образцы одной серии должны храниться вплоть до начала испытаний в одинаковых, как правило, нормальных температурно-влажностных условиях, исключающих возможность испарения влаги из бетона» (п. 4.2.6 ГОСТ 24544-2020). Таким образом, измерение усадки осуществляется уже после достижения образцами проектной прочности, а сами испытания должны проводиться при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(60 \pm 5) \%$. Измерение деформаций при таких условиях не дает представления о величине полной усадки: из расчета исключается объем контракционной и частично влажностной усадки. Более того, в реальных условиях эксплуатации будут наблюдаться более значительные деформации по сравнению с лабораторными испытаниями.

По этой причине для проведения измерений усадочных деформаций датчики линейных перемещений помещались в свежесформованную смесь, позволяя фиксировать изменения объема непосредственно в процессе твердения образцов (рис. 3, а). Далее формы хранились в течение 14 суток в условиях с разной влажностью среды. (рис. 3, б).

Таблица 1

Распыл кольца цементно-песчаных растворов

Характеристика	КО	Состав с добавлением 5 % перлита	Состав с добавлением 10 % перлита	Состав с добавлением 15 % перлита	Состав с добавлением 20 % перлита
Распыл кольца, мм	133	135	132	134	135

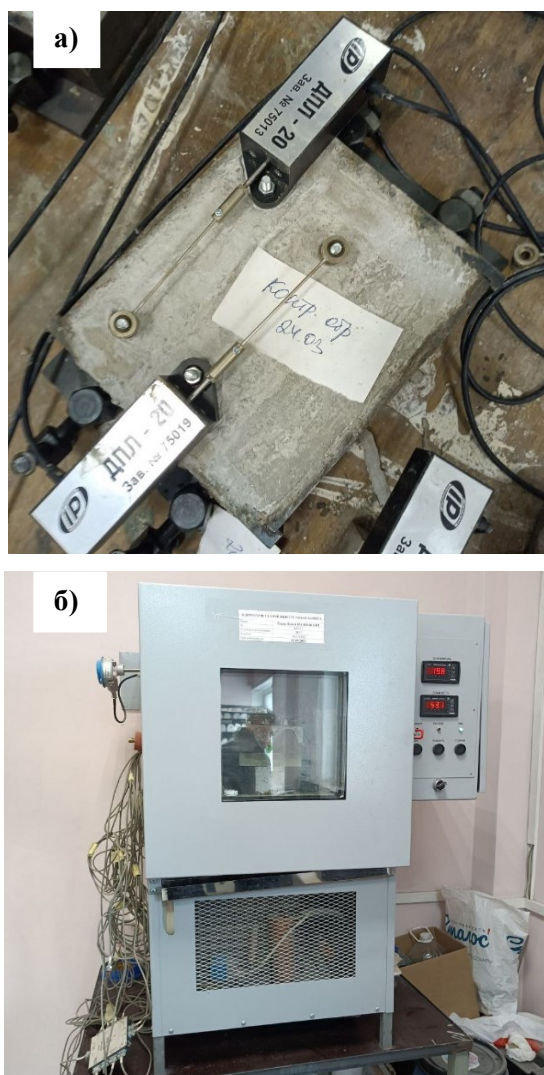


Рис. 3. Оборудование для проведения испытаний:
а – установленные в образцы датчики линейных перемещений прибора ТЕРЕМ 4.0; б – климатическая испытательная камера Тепло-Влага М 0/100-80 кВт

Результаты и обсуждение. На рис. 4 представлены графики, показывающие развитие усадочных деформаций контрольного состава и составов с замещением части песка перлитом в условиях пониженной влажности среды.

Как видно из всех четырех графиков, выдерживание образцов в среде с низкой влажностью приводит к резкому увеличению усадки в первые 3–4 часа после укладки бетонной смеси. Наиболее положительная динамика в сравнении с контрольными образцами наблюдается у состава с наименьшей долей перлита (рис. 4, а). У второго состава в первые сутки твердения также можно увидеть довольно незначительное развитие деформаций, однако уже на вторые сутки наблюдается увеличение данного параметра. К концу испытания величина усадки данного состава практически совпадает с результатами, полученными на контрольном составе (рис. 4, б). Дальнейшее

увеличение концентрации перлита не приводит к снижению усадочных деформаций. Вероятно, это связано с тем, что при замене песка более 10 % происходит значительное увеличение доли цемента в единице объема, из-за чего возникает плавающая бесконтактная структура, характерная для «жирных» растворов. Следовательно, это приводит к повышению усадки при низкой влажности окружающей среды, которую влияние внутренних агентов не в состоянии компенсировать.

На рис. 5 представлены графики, показывающие развитие усадочных деформаций контрольного состава и составов с замещением части песка перлитом в условиях более высокой влажности среды.

Из графиков видно, насколько чувствительны образцы к резким изменениям влажности даже в пределах 10 %: значительные скачки как в сторону увеличения влажности, так и в сторону уменьшения проявляются в изменении угла наклона графика усадки. Наилучшими показателями обладает состав с концентрацией перлита в количестве 20 % (рис. 5, г), который выдерживался при влажности не менее 65 %. Наибольшая усадка наблюдается у состава с 5 % перлита (рис. 5, а) при условии резкого снижения влажности на вторые сутки твердения до диапазона 40–50 %.

При сопоставлении результатов испытаний образцов в условиях низкой, средней и высокой влажности среды можно сделать вывод о том, что эффект от замены части песка перлитом в большей степени проявляется в условиях низкой влажности при низкой концентрации добавки и в условиях высокой влажности при большей доле перлита.

Выводы. Составы, используемые при ремонте бетонных конструкций, должны отвечать ряду требований. Помимо быстрого набора прочности, хорошей адгезии, совместности свойств со свойствами ремонтируемого основания, необходимым критерием является отсутствие усадки. В виду того, что ремонтные составы применяются в условиях, когда обеспечить внешний уход за свежесделанной смесью зачастую невозможно, встает вопрос о необходимости разработки материала, способного твердеть в неблагоприятных атмосферных условиях (в частности – при низкой влажности среды). С этой точки зрения введение в состав цементно-песчаного раствора перлита как замену части песка в количестве не более 5 % по объему является эффективным способом снижения усадочных деформаций в сухих условиях. При увеличении доли перлита и снижении доли песка более 10 % по объему использование перлита является нецелесообразным,

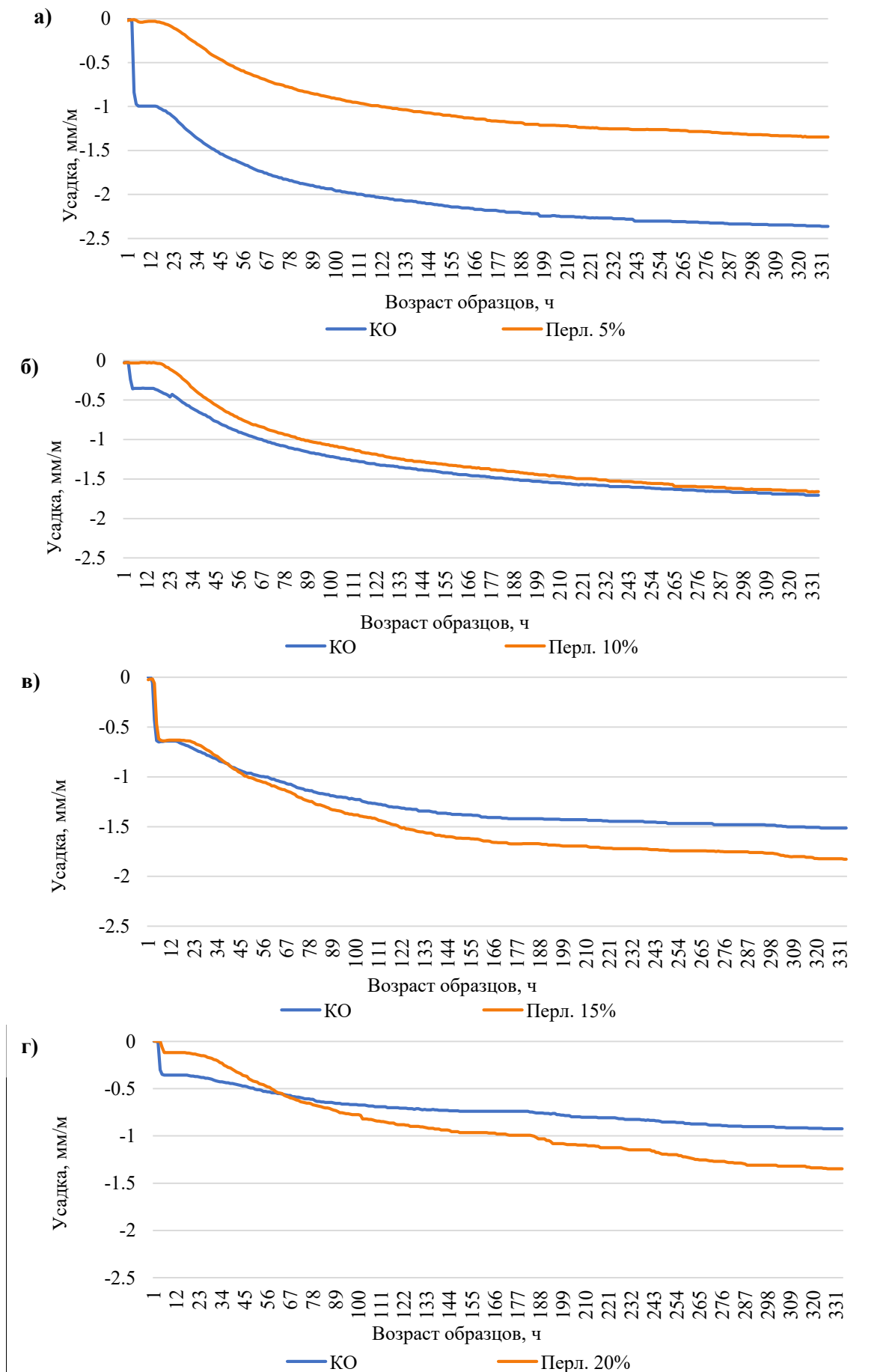


Рис. 4. Графики развития усадочных деформаций при влажности среды 30÷40 % контрольного состава и составов с замещением части песка перлитом: а – 5 %; б – 10 %; в – 15 %; г – 20 %

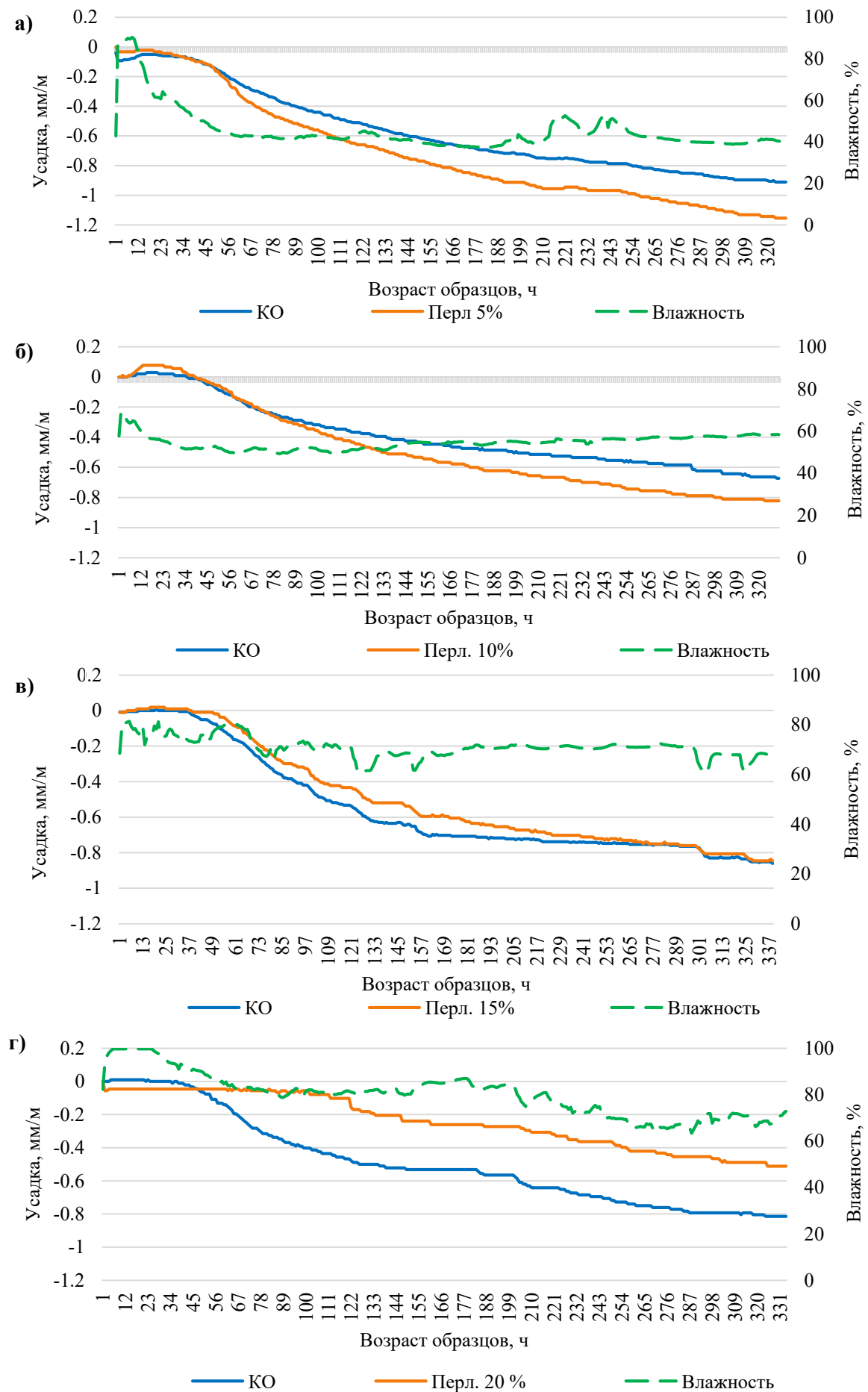


Рис. 5. Графики развития усадочных деформаций при влажности среды 40÷100 % контрольного состава и составов с замещением части песка перлитом: а – 5 %; б – 10 %; в – 15 %; г – 20 %

так как увеличение доли цемента в единице объема нивелирует положительный эффект от применения агентов внутреннего ухода.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с изменением способа дозирования и введения перлитового песка в раствор для сохранения соотношения доли цемента к кварцевому песку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коваленко Д.С. Перспективы создания экономических бетонов с пониженной усадкой на основе отходов промышленности // Интеграция наук. 2017. № 3 (7). С. 65–70.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Высш.шк., 1987. 415 с.
3. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р. Состав, свойства и применение специальных цементов // Технологии бетонов. 2014. № 2(91). С. 8–11.
4. Каспер Е.А., Бочкарева О.С. Мелкозернистые бетоны, дисперсно-армированные базальтовой фиброй // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1(25). С. 135–138.
5. Лесовик В.С., Гридчина А.А. Монолитные бетоны на основе расширяющих добавок и химических модификаторов // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 81–83.
6. Еленова, А.А., Кривобородов Ю.Р. Синтез расширяющей добавки для устранения усадки цементного камня // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12, № 3(102). С. 326–333. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.326-333.
7. Назарова А.В., Ал-Маршди К.С.Р., Коваленко Д.С. Эффективные способы минимизации усадочного трещинообразования в цементобетоне // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2017. № 2(124). С. 65–70.
8. Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K.L. Delayed ettringite formation // Cement and Concrete Research. 2001. Vol. 31, Iss. 5. Pp. 683–693. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00466-5.
9. RILEM Report 41. Internal curing of concrete – state of the art. In: Kovler K, Jensen O.M. editors. RILEM Publications S.A.R.L. 2007. 161 p.
10. Ковлер К., Оле Йенсен М., Фаликман В. Как сделать хороший бетон еще лучше? // Технологии бетонов. 2005. № 1. С. 52–60.
11. Hamzah N., Mohd Saman H., Baghban M.H., Mohd Sam A.R., Faridmehr I., Muhd Sidek M.N., Benjeddou O., Huseien G.F. A Review on the Use of Self-Curing Agents and Its Mechanism in High-Performance Cementitious Materials // Buildings. 2022. № 12 (152). DOI: 10.3390/buildings12020152.
12. Barabanshchikov Iu.G., Popyvanova Z.D., Usanova K.Iu., Akimov S.V. The Effectiveness of Polymer-Paraffin Emulsions to Reduce Moisture Loss from Hardening Concrete // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. № 3 (88). 8801. DOI: 10.18720/CUBS.88.1.
13. Bentz D.P., Weiss W.J. Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review // US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 2011. 82 p. DOI: 10.6028/NIST.IR.7765.
14. Williams A., Markandeya A., Stetsko Yu., Riding K., Zayed A. Cracking potential and temperature sensitivity of metakaolin concrete // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 120. Pp. 172–180. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.087.
15. Алексеева Л.В., Нациевский С.Ю. Опыт применения вспученного перлита в строительстве // Строительные материалы и изделия. 2013. №5-6 (82-83). С. 62–64.
16. Крупа А.А. Физико-химические основы получения пористых материалов из вулканических стекол. Киев: Вища школа, 1978. 136 с.
17. Нациевский С.Ю., Алексеева Л.В. Производство сухих строительных смесей с применением вспученного перлита // Сухие строительные смеси. 2012. № 6. С. 26–27.
18. Седакова М.Т. Применение перлитобетона в жилищном строительстве. М.: Стройиздат, 1971. 118 с.
19. Зайченко Н.М., Лахтарина С.В. Конструкционный лёгкий бетон с внутренним уходом // Строитель Донбасса. 2018. № 1(2). С. 7–16.
20. Rashad A.M. A synopsis about perlite as building material – a best practice guide for Civil Engineer // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 121. Pp. 338–353. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001.
21. Харитонов А.М., Сидорова А.С., Андреев Д.М. Применение добавки вспученного перлита для модификации свойств цементных композитов // Цемент и его применение. 2023. № 4. С. 72–75.

Информация об авторах

Сидорова Анастасия Сергеевна, аспирант кафедры технологии строительных материалов и метрологии. E-mail: Sidorovaas96@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 14.04.2024 г.

© Сидорова А.С., 2024

Sidorova A.S.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail Sidorovaas96@mail.ru

ANALYSIS OF PERLITE ADDITIVE AS INTERNAL CURE AGENT IN CEMENT CONCRETE SYSTEM

Abstract. At the present stage of development of materials science, there are a large number of ways to reduce shrinkage in cement composite systems. However, not every of these methods can be classified as reliable, capable of providing the effect of non-shrinkage under any conditions. This problem becomes especially relevant when it comes to concretes and mortars that are intended for work in difficult conditions, for example, repair mortars.

The main methods of curing for freshly molded concrete are analyzed, and the use of perlite sand as an internal maintenance agent to reduce shrinkage in the manufacture of repair mortars is justified. A method for measuring shrinkage using the TEREM 4.0 measuring complex is described.

The effect of replacing part of the fine aggregate (quartz sand) with light aggregate (perlite sand) is considered. Graphs of the dependences of the shrinkage value were obtained for different contents of perlite sand and under conditions of low and high environmental humidity. It has been established that the introduction of fine fraction perlite into the cement-sand mortar, as a replacement for part of the sand, in an amount of no more than 5 % by volume is an effective way to reduce shrinkage deformations in dry conditions ($\varphi \leq 40\%$).

Keywords: hardened cement paste, lightweight aggregate, perlite, internal cure, shrinkage.

REFERENCES

1. Kovalenko D.S. Prospects of creating an economical concrete with reduced shrinkage based on waste industry [Perspektivy sozdaniya ekonomichnyh betonov s ponizhennoj usadkoj na osnove othodov promyshlennosti]. Integraciya nauk. 2017. No 3. Vol.7. Pp. 65–70. (rus)
2. Bazhenov Yu.M. Concrete technology [Tekhnologiya betona]. Moscow: Higher school, 1987. 415 p. (rus)
3. Kuznetsova T.V., Krivoborodov Yu.R. Composition, properties and application of special cements [Sostav, svoystva i primeneniye special'nyh cementov]. Concrete Technologies. 2014. Vol. 91, Iss. 2. Pp. 8–11. (rus)
4. Kasper E.A., Bochkareva O.S. Fine-grained concrete, dispersedly reinforced with basalt fiber [Melkozernistye betony, dispersno-armirovannye bazalt'ovoj fibroj] Systems. Methods. Technologies. 2015. Vol. 25, Iss. 1. Pp. 135–138. (rus)
5. Lesovik V.S., Gridchina A.A. Monolithic concrete based on expanding additives and chemical modifiers [Monolitnye betony na osnove rasshiryayushchih dobavok i himicheskikh modifikatorov]. Construction materials. 2015. No. 8. Pp. 81–83. (rus)
6. Elenova A.A., Krivoborodov Yu.R. Synthesis of an expanding additive to eliminate shrinkage of cement stone [Sintez rasshiryayushchej dobavki dlya ustraneniya usadki cementnogo kamnya]. Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12, No. 3(102). Pp. 326–333. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.326-333. (rus)
7. Nazarova A.V., Al-Marshdi K.S.R., Kovalenko D.S. Effective ways to minimize shrinkage cracking in cement concrete [Effektivnye sposoby minimizatsii usadochnogo treshchinoobrazovaniya v cementobetone]. Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury. 2017. Vol. 124, Iss. 2. Pp. 65–70. (rus)
8. Taylor H.F.W., Famy C, Scrivener K.L. Delayed ettringite formation. Cement and Concrete Research. 2001. Vol. 31, Iss. 5. Pp. 683–693. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00466-5.
9. RILEM Report 41. Internal curing of concrete – state of the art. In: Kovler K, Jensen O.M. editors. RILEM Publications S.A.R.L. 2007. 161 p.
10. Kovler K., Ole Jensen M., Falikman V. How to make good concrete even better? [Kak sdelat' horoshij beton eshche luchshe?]. Concrete technologies. 2005. No 1. Pp. 52–60. (rus)
11. Hamzah N., Mohd Saman H., Baghban M.H., Mohd Sam A.R., Faridmehr I., Muhd Sidek M.N., Benjeddou O., Huseien G.F. A Review on the Use of Self-Curing Agents and Its Mechanism in High-Performance Cementitious Materials. Buildings. 2022. Vol. 152, Iss. 12. DOI: 10.3390/buildings12020152.
12. Barabanshchikov Iu.G., Popyvanova Z.D., Usanova K.Iu., Akimov S.V. The Effectiveness of Polymer-Paraffin Emulsions to Reduce Moisture Loss from Hardening Concrete. Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 88, Iss. 3. 8801. DOI: 10.18720/CUBS.88.1.
13. Bentz D.P., Weiss W.J. Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland. 2011. 82 p. DOI: 10.6028/NIST.IR.7765.
14. Williams A., Markandeya A., Stetsko Yu., Riding K., Zayed A. Cracking potential and temperature sensitivity of metakaolin concrete. Construction

and Building Materials. 2016. Vol. 120. Pp. 172–180. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.087.

15. Alekseeva L.V., Natsievsky S.Yu. Experience in using expanded perlite in construction [Opyt primeneniya vspuchennogo perlita v stroitel'stve]. Construction materials and products. 2013. Vol. (82-83), Iss. 5-6. Pp. 62–64. (rus)

16. Krupa A.A. Physico-chemical basis for obtaining porous materials from volcanic glasses [Fiziko-himicheskie osnovy polucheniya poristykh materialov iz vulkanicheskikh stekol]. Kyiv: Vishcha School, 1978. 136 p. (rus)

17. Natsievsky S.Yu., Alekseeva L.V. Production of dry building mixtures using expanded perlite [Proizvodstvo suhih stroitel'nyh smesey s primeneniem vspuchennogo perlita]. Suhie stroitel'nye smesi. 2012. No. 6. Pp. 26–27. (rus)

18. Sedakova M.T. Application of perlite concrete in housing construction [Primenenie perlitobetona v zhilishchnom stroitel'stve]. Moscow.: Stroyizdat, 1971. 118 p. (rus)

19. Zaichenko N.M., Lakhtarina S.V. Structural lightweight concrete with internal maintenance [Konstrukcionnyj lyogkij beton s vnutrennim uходом]. The Donbas Contractor. 2018. Vol. 2, Iss. 1. Pp. 7–16. (rus)

20. Rashad A.M. A synopsis about perlite as building material – a best practice guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 121. Pp. 338–353. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001.

21. Kharitonov A.M., Sidorova A.S., Andreev D.M. Expanded perlite additive for modification of properties of cement composites [Primenenie dobavki vspuchennogo perlita dlya modifikacii svoystv cementnykh kompozitov]. Cement and its application. 2023. Iss. 4. Pp. 72–75. (rus)

Information about the authors

Sidorova, Anastasia S. Postgraduate student. E-mail: Sidorovaas96@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St Petersburg, st. 2nd Krasnoarmeiskaya, 4.

Received 14.04.2024

Для цитирования:

Сидорова А.С. Исследование добавки перлита как элемента внутреннего ухода в системе цементных композитов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-25-34

For citation:

Sidorova A.S. Analysis of perlite additive as internal cure agent in cement concrete system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-25-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-35-42

Сулейманова Л.А., *Есипов С.М., Се Ду

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: sk31.sm@gmail.com

СОПРОТИВЛЕНИЕ КЛАДКИ ИЗ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ НА ПОЛИУРЕТАНОВОМ КЛЕЕ ЦЕНТРАЛЬНОМУ СЖАТИЮ

Аннотация. В статье авторами рассмотрены предпосылки применения полиуретанового клея в кладке из ячеистобетонных блоков для жилищного домостроения, сформулированы теоретические гипотезы зависимости работы кладки из ячеистобетонных блоков от толщины и материала шва при сжатии, приведены результаты экспериментальных исследований сопротивления простенков кладки из ячеистобетонных блоков кратковременному центральному сжатию, установлена зависимость изменения прочности кладки на сжатие от толщины и материала шва. Результаты испытаний оценивались путем сравнения разрушающих усилий для образцов со швами из цементно-песчаного раствора толщиной 5 мм и образцов со швами из полиуретанового клея толщиной 3 мм. Было установлено, что прочностные свойства кладки при изменении материала кладочного шва и его толщины меняются, в наиболее показательной серии испытаний прирост прочности составил порядка 19 %. При этом характер разрушения не претерпел изменения – хрупкий, вследствие сверхнормативного раскрытия вертикальных магистральных трещин в камне и частично в швах. Деформативность кладки не изменилась, предельные деформации для образцов с полиуретановым клеем и цементно-песчаным раствором оказались идентичны. Доказана применимость полиуретановых клеев в качестве аналога классических растворных швов для кладки стен.

Ключевые слова: ячеистобетонные изделия, полиуретановый клей, цементно-песчаный раствор, сопротивление кладки, прочность при центральном сжатии.

Введение. Ячеистобетонные, в частности, газобетонные блоки и изделия являются одним из наиболее массовых материалов для кладки наружных стен в жилищном и индивидуальном домостроении в РФ [1–2].

Подобные стены обладают невысокой теплопроводностью по сравнению с аналогами из схожих по технико-экономическим показателям вариантов конструктивного решения, что приводит к их высокой эффективности в качестве основы для ограждающих вертикальных конструкций зданий. Устройство газобетонных стен требует применения кладочных цементных растворов в классическом понимании либо тонкослойных цементных и полимерцементных клеев без наполнителей и мелких заполнителей. Однако, кладочные швы, из какого бы материала их не выполнили, образуют так называемые локальные теплотехнические неоднородности – «мостики холода» [3–7], поскольку их теплопроводность, составляющая интервал 0.93...0.97 Вт/м·°С, значительно выше теплопроводности непосредственно самого ячеистого бетона 0.15 Вт/м·°С для наиболее популярных марок по плотности D400...D500. Это приводит к тому, что швы кладки вызывают дополнительные потери тепла, достигающие при использовании условно «тонких» цементных клеев – до 10 %, а при использовании «толстых» цементно-песчаных растворов – до 30 %. Данная разница показывает долю увеличения дополнительных затрат тепловой энергии при отоплении помещений по сравнению с

монолитным массивом из ячеистого бетона при допущении отсутствия швов [8–11].

Одной из возможностей повышения теплоизоляционных свойств кладки из ячеистобетонных блоков является использование в качестве заполнителя швов однокомпонентных полиуретановых клеев. Помимо снижения непосредственно теплопроводности теплотехнически неоднородной кладки, полиуретановый клей позволяет снизить эффект от теплового расширения материалов и снизить вероятность образования неплотностей, играющих роль теплопроводников.

Полиуретановый клей – адгезионный состав из изоцианитов, обладающий хорошей адгезией к различным поверхностям, в том числе к изделиям из автоклавного газобетона, а также высокой прочностью, устойчивостью к влаге, теплу и химическим воздействиям. Преимущества ячеистобетонной кладки на полиуретановых швах подробно приведены в работах [12–14]. В ряде работ авторов [9, 15] приводятся данные исследований, говорящих о том, что при возведении межкомнатных перегородок на полиуретановых швах отмечается локальный рост их трещиностойкости вследствие увеличения доли упругих деформаций и снижения доли общей хрупкости зоны контакта блока и раствора, а также повышение уровня предельных деформаций сдвига в горизонтальных швах растянутой зоны перегородки, работающей по балочной схеме при появлении прогибов перекрытия. Похожее поведение

можно спрогнозировать и для наружных ячеисто-бетонных стен, опирающихся на монолитное железобетонное перекрытие.

Исходя из вышесказанного обзора можно сделать вывод, что в настоящий момент строительная индустрия имеет потребность в наличии решений ограждающих конструкций из конструкционно-теплоизоляционных изделий низкой плотности с кладочными составами на основе полиуретана и ему подобных полимеров.

Авторами [3–7] разработана двухрядная энергоэффективная кладка стен из ячеистобетонных блоков с применением полиуретанового клея. Данный вариант конструктивного решения обладает нестандартным способом перевязки, локализирующим швы в зонах горизонтальной разрезки, что уменьшает количество сквозных швов (т.е. проходящих на всю толщину простенка), что увеличивает сопротивление ветровому давлению, продувающему кладку насквозь, и тем самым повышает теплотехническую однородность стеновых конструкций на 10–30 %.

Данные испытаний [16] демонстрируют, что прочность кладки образцов с использованием полиуретановых клеев при растяжении и изгибе параллельно и перпендикулярно горизонтальным швам превышает прочность кладки на обычных минеральных растворах на 40 %.

Полиуретановый клей характеризуется низкой сдвиговой жесткостью, что снижает трещиностойкость кладки и ограничивает его применение в качестве материала для заполнения швов. Это позволяет использовать полиуретановый клей только при устройстве несущих стен зданий [16, 17].

Однако, вопросом влияния материала и толщины шва на прочность кладки при сжатии ни занимался практически никто из исследователей. В нормативной документации толщина шва непосредственно не фигурирует в расчетных характеристиках, однако, при превышении условной относительной толщины расчетное сопротивление кладки снижается, это косвенно указано в [8].

Материалы и методы. Для решения данного вопроса были проведены теоретические и практические исследования, заключающиеся в предварительном теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении гипотезы о повышении несущей способности простенков из ячеистобетонных блоков на полиуретановом клее по сравнению с цементно-песчаным раствором. В качестве стартовой программы исследований рассматривались исключительно случаи центрального сжатия коротких (гибкость по вертикали, т.е. в рамках данной задачи отношение высоты к толщине кладки с учетом коэффициента приведения расчетной длины менее 10) простенков кратковременной нагрузкой до стадий трещинообразования и разрушения. Данное упрощение принято с целью изучения работы кладки без учета факторов потери устойчивости.

Исходя из методики расчета, изложенной в [8], расчетные сопротивления кладки стен, нагружаемых до набора раствором (клеем) проектной прочности, рекомендуется принимать по марке раствора, отвечающей его прочности в эти сроки.

В соответствии с формулой (9.1) [8] прочность стен из блоков из автоклавных ячеистых бетонов на внецентренное сжатие от вертикальных нагрузок и изгибающих моментов определяется по формуле:

$$N = R \cdot \gamma_{b2} \cdot \gamma_{b9} \cdot \gamma_{b11} \cdot \gamma_c \cdot m_g \cdot \varphi_1 \cdot b \cdot h \cdot \left[12 \left(\frac{e_0}{h} \right)^2 + 6 \frac{e_0}{h} + 1 \right]^{-0.5} \geq N_n, \quad (1)$$

где R – расчетное сопротивление сжатию кладки из блоков (таблица 9.1 [СТО НААГ]);

γ_{b2} – коэффициент условий работы, учитывающий длительность действия нагрузки, принимаемый равным 0,85;

γ_{b9} – коэффициент условий работы для бетонных конструкций (не армированных расчетной арматурой), принимаемый равным 0,9;

γ_{b11} – коэффициент условий работы, учитывающий влажность ячеистого бетона 25 % и более, принимаемый равным 0,85;

γ_c – масштабный коэффициент для столбов и простенков площадью сечения 0,3 м² и менее, принимаемый равным $\gamma_c = 0,8$;

b – ширина простенка;

h – толщина простенка;

e_0 – сумма случайного (0,02 м) и силового $\frac{M}{N_n}$ эксцентриситета;

M – изгибающий момент от перекрытия и ветра в рассчитываемом сечении;

$N_n = \sum N_g$ – сумма всех вертикальных нагрузок на 1 пог. м;

m_g – коэффициент, определяемый по формуле (2):

$$m_g = 1 - \eta \cdot \frac{N_g}{N_n} \cdot \left(1 + \frac{1,2 \cdot e_{og}}{h} \right), \quad (2)$$

где N_g – расчетная продольная сила от длительных нагрузок;

e_{og} – эксцентриситет от действия длительных нагрузок;

η – коэффициент, зависящий от гибкости простенка.

Если адаптировать входящие в формулы 1 и 2 величины к кратковременной нагрузке и центральному сжатию (т.е. обнулить изгибающий момент, а коэффициент условий работы, учитывающий длительность действия нагрузки, принять равным 1), то для образцов цементно-песчаного раствора и полиуретанового клея расчетная прочность должна оказаться равной. Однако, в таблице 9.1 [8] указано, что допустимо повысить расчетное сопротивление кладки на растворах с толщиной шва 2 ± 1 мм до 30 % при экспериментальном обосновании. Т.к. в случае образцов на полиуретановом клее толщина шва составляет 3 мм, то данное допущение можно считать применимым и для создания доказательной базы провести ряд экспериментальных исследований. Стоит отметить, что полиуретановый клей позволяет теоретически создать швы толщиной до 1 мм, но в рамках данного исследования эта особенность использована не была.

Испытания фрагментов ячеистобетонной кладки на цементно-песчаном растворе (ЦПР) и полиуретановом клее проводились в испытательной лаборатории БГТУ им. В.Г. Шухова на поверенном оборудовании с использованием механической оснастки и тензометрического оборудования

Основная часть. Исследования прочности кладки из ячеистобетонных блоков производились на образцах размером (Д×В×Ш): 405×306×100 мм для полиуретанового клея и размером (Д×В×Ш): 410×310×100 мм (рис. 1) для ЦПР.

Для кладки образцов применялись следующие материалы:

- изделия стеновые неармированные из ячеистого бетона автоклавного твердения, выпускаемые по [1] со следующими физико-механическими и геометрическими характеристиками: марка по плотности D600; класс по прочности на сжатие B2,5; размер блоков (Д×В×Ш): 200×100×100 мм;

- однокомпонентный полиуретановый клей;

- цементно-песчаный раствор марки М50.

Кладка экспериментальных образцов выполнялась ложковым способом, вертикальные швы перевязывались на длину в полблока. Далее наносился клей на тычки блоков с последующей подгонкой ряда, затем клей расстился на постели блоков.

Перед началом испытаний образцы на полиуретановом клее выдерживались в стандартных условиях.

Испытание образцов на сжатие производилось на 100-тонном прессе по стандартной методике. Деформации каждого образца измерялись индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм, встроенным в пресс. Центрирование нагрузки выполнялось с помощью качающегося шарнира ступичного типа. Распределение нагрузки по поверхности образца выполнялось с помощью металлических обрезиненных подложек, зафиксированных на растворе. Нагружение происходило ступенчато, со скоростью не более 10 мм/мин, с выдержкой на каждой ступени не менее 10 минут. Общий вид проведения испытаний приведен на рисунке 1. Анализ результатов измерений деформаций кладки показывает, что на участке до начала трещинообразования, т.е. приблизительно до 30 % от разрушающей нагрузки, продольные и поперечные деформации нарастают линейно и составляют порядка 0,4...0,5 мм и 0,1 мм соответственно. Начало образования трещин вызывает резкий рост деформативности и при нагрузке в 70 % от разрушающей продольная деформация составляет уже свыше 1,5 мм, поперечная – свыше 0,5 мм. Деформации при разрушении не фиксировались в силу ограничений измерительного оборудования и риска выхода из строя. Анализ показаний видеосъемки процесса разрушения позволяет судить о величине перемещения в точке потери несущей способности порядка 4,0 мм.

Всего было испытано 3 фрагмента кладки с каждым из клеевых составов. Результаты испытания фрагментов на прочность при сжатии представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытания кладки на прочность при сжатии

Номер образца	Материал шва	Нагрузка, кН		Напряжение, МПа	
		Трещины	Разрушение	Трещины	Разрушение
1	2	3	4	5	6
1ц	ЦПР	24,3	70,0	0,59	1,7
2ц	ЦПР	23,9	66,3	0,58	1,61
3ц	ЦПР	20,6	65,5	0,5	1,6
Среднее				0,56	1,64
1п	ПУ	26,8	81,2	0,66	2
2п	ПУ	28,1	82,5	0,69	2,03
3п	ПУ	28,0	78,6	0,69	1,94
Среднее				0,68	1,99

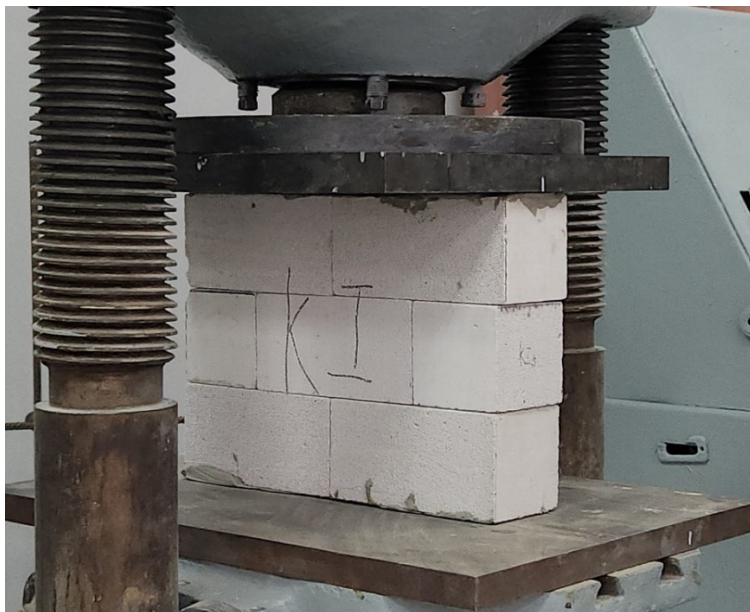


Рис. 1. Испытание образца с ПУ швом

Известно, что формула (3) в [16] приведена для кладок из мелкоштучных камней на цементно-песчаном растворе. Для кладки на клеевых составах коэффициент перехода от предела прочности к расчетному сопротивлению кладки сжатию может существенно отличаться от значений, представленных в таблице 15 [16]. Для срав-

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(1,7 - 1,64)^2 + (1,61 - 1,64)^2 + (1,6 - 1,64)^2}{3}} = 0,045 \quad (3)$$

где x_i – результаты испытаний кладки на сжатие;

$\bar{x}$ – средний предел прочности сжатию кладки, $\bar{x} = R_u = 1,64$ МПа;

n – количество испытаний, $n = 3$.

На основе полученного среднеквадратического отклонения σ рассчитаем коэффициент вариации V . Получим:

нительного анализа результатов испытаний образцов серий произведем определение нормативного значения сопротивления кладки сжатию на базе результатов, приведенных в таблице 1.

ЦПР образцы:

Среднеквадратическое отклонение σ :

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{0,045}{1,64} = 0,027. \quad (4)$$

Вариация слабая, статистическая совокупность – однородная. Определим нормативное сопротивление кладки сжатию R_n :

$$R_n = R_u - t_p \cdot \sigma = 1,64 - 1,96 \cdot 0,045 = 1,55 \text{ (МПа)}, \quad (5)$$

где R_u – средний предел прочности сжатию кладки;

σ – среднеквадратическое отклонение прочности;

t_p – показатель достоверности, принимаемый по [20].

Полиуретановые образцы:

Среднеквадратическое отклонение σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(2 - 1,99)^2 + (2,03 - 1,99)^2 + (1,94 - 1,99)^2}{3}} = 0,037 \quad (6)$$

где x_i – результаты испытаний кладки на сжатие;

$\bar{x}$ – средний предел прочности сжатию кладки, $\bar{x} = R_u = 1,99$ МПа;

n – количество испытаний, $n = 3$.

Определим коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{0,037}{1,99} = 0,018. \quad (7)$$

Вариация слабая, статистическая совокупность – однородная. Определим нормативное сопротивление кладки сжатию R_n :

$$R_n = R_u - t_p \cdot \sigma = 1,99 - 1,96 \cdot 0,037 = 1,92 \text{ (МПа)}, \quad (8)$$

где R_u – средний предел прочности сжатию кладки;

σ – среднеквадратическое отклонение прочности;

t_p – показатель достоверности, принимаемый по [17].

В силу того, что деформативность полиуретанового клея достаточно высока, трещинообразование в кладке возникает задолго (в среднем при уровне действующего осевого усилия не более 0.3...0.35 от разрушающего) до потери несущей способности. Данное явление не является стандартным поведением для ячеистобетонной кладки. Так происходит, потому что сниженная изгибная жесткость горизонтальных швов вызывает перераспределение усилий в нормальных сечениях, превращая образец в составной стержень, работающий на изгиб в близкой к предельной стадии. В результате на участке упругих деформаций вплоть до разрушения происходит ин-



Рис. 2. Образец ЦПР после разрушения

Полученные значения нормативной прочности существенно отличаются – рост показателя для ПУ образцов составил 19,2 %, что имеет хорошую сходимость с интервалом 0...30 %, указанным в п. 2 примечаний к таблице 9.1 [8]. Авторы связывают этот факт с уменьшением толщины шва, что изменяет напряженно-деформированное состояние контактной зоны шва с блоками и позволяет более полно реализовать прочность ячеистого бетона при работе на сжатие. Снижение объемной доли шва также увеличивает долю теплотехнической однородности кладки. Это позволяет говорить о том, что применение полиуретановых клеев помимо увеличения прочности кладки дает эффект и повышения приведенного расчетного сопротивления теплопередаче [19, 20].

Выводы. На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы.

1. Использование полиуретанового клея для ячеистобетонной кладки повышает ее несущую способность на центральное сжатие при кратковременном нагружении на 19,2 %.
2. При этом повышается трещиностойкость на 17,6 %, несмотря на более раннее трещинообразование.

тенсивное трещинообразование. Основная ориентация трещин кладки – вертикальные. Также стоит отметить несколько различающиеся характеры доведения до разрушения образцов в запредельных стадиях испытаний: кладка на растворе разрушается хрупко, с выколом отдельных фрагментов и блоков, на клею – более пластично с образованием сетки мелких трещин на всех гранях. Авторы объясняют эффект большим сопротивлением на сдвиг швов кладки на клею, что создает некую условную четырехгранную обойму по зоне контакта с соседними блоками. В случае раствора деформативности шва и блока довольно сопоставимы. Образцы после испытаний приведены на рисунках 2 и 3.



Рис. 3. Образец ПУ после разрушения

3. В число вопросов, необходимых для исследования, входит проведение испытаний с длительным нагружением и приложением внецентренно сжимающей нагрузки как основных факторов действительной работы при использовании ячеистобетонной кладки как конструктивно-теплоизоляционного материала наружных стен.

4. Необходимо теоретически обосновать прирост несущей способности при замене материала шва с помощью коррелирующих коэффициентов, учитывающих жесткость и толщину кладочных швов, на что указывают в том числе результаты исследований.

5. Одним из направлений проблематики научного исследования также остается определение фактической несущей способности при центральном и внецентренном сжатии энергоэффективной кладки с измененной схемой разрезки швов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левченко В.Н., Гринфельд Г.И. Производство автоклавного газобетона в России. История, современность, перспективы // Научно-практическая конференция «Современное производство автоклавного газобетона»: сборник докладов. СПб. 2011. С. 5–9.

2. Гладких А.А., Горшков А.С. Влияние растворяющих швов кладки на параметры теплотехнической однородности стен из газобетона // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 3(13). С. 39–42.
3. Сулейманов К.А., Погорелова И.А., Рябчевский И.С. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 17–24.
4. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Suleymanov K.A. Energy efficiency improvement of aerated concrete block wall fences // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 945. 012006. DOI 10.1088/1757-899X/945/1/012006.
5. Патент 196502, Российская Федерация, МПК E04B 2/02. Энергоэффективная кладка стен из ячеистобетонных блоков / Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С., Коломацкий А.С., Погорелова И.А., Марушко М.В., Баженова О.О.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2019141142, опубл. 11.12.2019. Бюл. № 7.
6. Патент 200968, Российская Федерация, МПК E04B 2/02. Кладка стен из ячеистобетонных блоков с их фиксацией по шву / Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С., Погорелова И.А., Сулейманов К.А., Марушко М.В., Амелин П.А.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2020126438, опубл. 05.08.2020. Бюл. № 32.
7. Патент 200967, Российская Федерация, МПК E04B 2/02. Кладка стен из ячеистобетонных блоков с их фиксацией / Сулейманова Л.А., Рябчевский И.С., Коломацкий А.С., Сулейманов К.А., Монко Д., Кулагов В.А.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2020126437, опубл. 05.08.2020. Бюл. № 32.
8. СТО НААГ 3.1-2013. Конструкции с применением автоклавного газобетона в строительстве зданий и сооружений. Правила проектирования и строительства. Санкт-Петербург. 2013. 176 с.
9. ГОСТ 31360-2007 Изделия стеновые неармированные из ячеистого бетона автоклавного твердения. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2008.
10. Деркач В.Н., Орлович Р.Б. Трещиностойкость каменных перегородок // Жилищное строительство. 2012. № 8. С. 34–37.
11. Kasa Lu.M., Habian E. Innovation on masonry glued with on-site PU-adhesive // 8th International Masonry Conference. 2010. Pp. 224–228.
12. Graubohm M., Brameshuber W. Investigation on the gluing of masonry units with polyurethane adhesive // 8th International Masonry Conference. 2010. Pp. 371–376.
13. Schlöglmann, K.H. Long-term behaviour of PUR-glued clay block masonry // 14th International Brick and Block Masonry Conference. 2008. 58 p.
14. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Ryabchevsky I.S. Energy-efficient double-row masonry of exterior walls of buildings made of cellular concrete blocks // IOP conference series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913(2). 022044. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022044
15. Firoz G.R.G., Suresh P., Sarode R.R. Comparative analysis of the G+10 RCC building using AAC blocks and conventional blocks // International Journal of Research and Technology (IRJET). 2019. Vol. 6(4). Pp. 2430–2435.
16. Li J., Yao Y.Y.Y. A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete // Cement and Concrete Research. 2001. Vol. 31(8). Pp. 1203–1206. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00539-7
17. Srivastava V., Kumar R., Agarwal V. Mehta P. Effect of Silica Fume on Workability and Compressive Strength of OPC Concrete // J. Environ. Nanotechnol. 2015. Vol. 3. Pp. 32–35. DOI: 10.13074/jent.2014.09.143086
18. Давидюк А.А., Фискинд Е.С., Гусарь О.А., Балакирева В.В. Преимущества в производстве и применении блоков из ячеистого бетона // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 41–43. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-41-43
19. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А., Петрова Т.М. Особенности пористой структуры ячеистых бетонов и ее влияние на теплопроводность // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 67–72. DOI 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71
20. Pukhkal V.A., Mottaeva A.B. FEM modeling of external walls made of autoclaved aerated concrete blocks // Magazine of Civil Engineering. 2018. Vol. 5. Pp. 202–211. DOI: 10.18720/MCE.81.20

Информация об авторах

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства и городского хозяйства, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Се Ди, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 18.02.2024 г.

© Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Се Ди., 2024

Suleymanova L.A., *Esipov S.M., Se D.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: sk31.sm@gmail.com*

RESISTANCE OF MASONRY MADE OF CELLULAR CONCRETE BLOCKS ON POLYURETHANE ADHESIVE TO CENTRAL COMPRESSION

Abstract. *In the article, the authors considered the prerequisites for the use of polyurethane glue in masonry made of cellular concrete blocks for housing construction, formulated theoretical hypotheses of the dependence of masonry made of cellular concrete blocks on the thickness and material of the seam during compression, presented the results of experimental studies of the resistance of masonry walls made of cellular concrete blocks to short-term central compression, established the dependence of the change in the compressive strength of masonry on the thickness and the seam material. The test results were evaluated by comparing the destructive forces for samples with joints made of cement-sand mortar with a thickness of 5 mm and samples with joints made of polyurethane glue with a thickness of 3 mm. It was found that the strength properties of masonry change when the material of the masonry seam and its thickness change, in the most indicative series of tests, the strength increase was about 19%. At the same time, the nature of the destruction has not changed – it is fragile, due to the excessive opening of vertical main cracks in the stone and partially in the seams. The deformability of the masonry did not change, the maximum deformations for samples with polyurethane glue and cement-sand mortar turned out to be identical. The applicability of polyurethane adhesives as an analogue of classical mortar joints for masonry walls has been proven.*

Keywords: *cellular concrete, polyurethane adhesive, cement-sand mortar, masonry strength, central compression.*

REFERENCES

1. Levchenko V.N., Grinfeld G.I. Production of autoclaved aerated concrete in Russia. History, modernity, prospects [Proizvodstvo avtoklavного газобетона v Rossii. Istoriya, sovremennost', perspektivy]. Nauchno-prakticheskaya konferenciya «Sovremennoe proizvodstvo avtoklavного газобетона»: sbornik dokladov. St. Petersburg. 2011. Pp. 5–9. (rus)
2. Gladkikh A.A., Gorshkov A.S. The influence of mortar joints of masonry on the parameters of thermal uniformity of aerated concrete walls [Vliyanie rastvornyh shvov kladki na parametry teploekhnicheskoy odnorodnosti sten iz gazobetona]. Engineering and Construction Journal. 2010. No. 3(13). Pp. 39–42. (rus)
3. Suleymanov K.A., Pogorelova I.A., Ryabchevsky I.S. Increasing the thermal uniformity of walls made of cellular concrete blocks [Povyshenie teploekhnicheskoy odnorodnosti sten iz yacheistobetonnykh blokov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 5. Pp. 17–24. (rus)
4. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Suleymanov K.A. Energy efficiency improvement of aerated concrete block wall fences. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 945. 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012006
5. Suleymanova L.A., Ryabchevsky I.S., Kolomatsky A.S., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Bazhenova O.O. Energy-efficient masonry of walls made of cellular concrete blocks. Patent RF, no. 196502, 2019. (rus)
6. Suleymanova L.A., Ryabchevsky I.S., Pogorelova I.A., Suleymanov K.A., Marushko M.V., Amelin P.A. Masonry of walls from cellular concrete blocks with their fixation at the seam. Patent RF, no. 200968, 2020. (rus)
7. Suleymanova L.A., Ryabchevsky I.S., Kolomatsky A.S., Suleymanov K.A., Monko D., Kulagov V.A. Masonry of walls from cellular concrete blocks with their fixation. Patent RF, no. 200967, 2020. (rus)
8. STO NAAG 3.1-2013. Structures using autoclaved aerated concrete in the construction of buildings and structures. Design and construction rules [STO NAAG 3.1-2013. Konstrukcii s primeneniem avtoklavного газобетона v stroitel'stve zdaniy i sooruzhenij. Pravila proektirovaniya i stroitel'stva]. Saint Petersburg. 2013. 176 p. (rus)
9. GOST 31360-2007 Non-reinforced wall products made of autoclaved cellular concrete. Technical conditions [GOST 31360-2007 Izdeliya stenovy'e nearmirovanny'e iz yacheistogo betona avtoklavного tverdeniya. Texnicheskie usloviya]. – M.: Standardinform. 2008. (rus)

10. Derkach V.N., Orlovich R.B. Crack resistance of stone partitions [Treshchinostojkost' kamennyh peregorodok]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2012. No. 8. Pp. 34–37. (rus)
11. Kasa Lu.M., Habian E. Innovation on masonry glued with on-site PU-adhesive. 8th International Masonry Conference. 2010. Pp. 224–228.
12. Graubohm M., Brameshuber W. Investigation on the gluing of masonry units with polyurethane adhesive. 8th International Masonry Conference. 2010. Pp. 371–376.
13. Schlöglmann K.H. Long-term behavior of PUR-glued clay block masonry. 14th International Brick and Block Masonry Conference. 2008. 58 p.
14. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Marushko M.V., Ryabchevsky I.S. Energy-efficient double-row masonry of exterior walls of buildings made of cellular concrete blocks. *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913(2). 022044. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022044.
15. Firoz G.R.G., Suresh P., Sarode R.R. Comparative analysis of the G+10 RCC building using AAC blocks and conventional blocks. *International Journal of Research and Technology (IRJET)*. 2019. Vol. 6(4). Pp. 2430–2435.
16. Li J., Yao Y.Y.Y. A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31(8). Pp. 1203–1206. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00539-7.
17. Srivastava V., Kumar R., Agarwal V. Mehta P. Effect of Silica Fume on Workability and Compressive Strength of OPC Concrete. *J. Environ. Nanotechnol.* 2015. Vol. 3. Pp. 32–35. DOI: 10.13074/jent.2014.09.143086.
18. Davidyuk A.A., Fiskind E.S., Gusar O.A., Balakireva V.V. Advantages in the production and use of cellular concrete blocks [Preimushchestva v proizvodstve i primenenii blokov iz yacheistogo betona]. *Construction materials*. 2018. No. 12. Pp. 41–43. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-41-43. (rus)
19. Vylegzhanin V.P., Pinsker V.A., Petrova T.M. Features of the porous structure of cellular concrete and its influence on thermal conductivity [Osobennosti poristoj struktury yacheistykh betonov i ee vliyanie na teploprovodnost']. *Construction materials*. 2021. No. 8. Pp. 67–72. DOI 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71 (rus)
20. Pukhkal V.A., Mottaeva A.B. FEM modeling of external walls made of autoclaved aerated concrete blocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 5. Pp. 202–211. DOI: 10.18720/MCE.81.20

Information about the authors

Suleymanova, Lyudmila A. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction and Urban Management, Head of the Department of Construction and Urban Management. E-mail: kafedrasigsh@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Esipov, Stanislav M. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Urban Management. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Se Di. Postgraduate student of the Department of Construction and Urban Management. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 18.02.2024

Для цитирования:

Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Се Ди. Сопротивление кладки из ячеистобетонных блоков на полиуретановом клее центральному сжатию // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 35–42. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-35-42

For citation:

Suleymanova L.A., Esipov S.M., Se D. Resistance of masonry made of cellular concrete blocks on polyurethane adhesive to central compression. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 7. Pp. 35–42. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-35-42

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-43-55

***Чебыкин Г.П., Беяева З.В., Кудрявцев С.В.**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

*E-mail: chebyn@yandex.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛЬНЫХ БАЛОК КРУТИЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ

Аннотация. В действующих отечественных строительных нормах проектирования стальных конструкций отсутствуют указания по обеспечению общей устойчивости балок крутильными связями. В то же время в конструкциях стальных каркасов зданий и мостов присутствуют элементы, которые могли бы брать на себя данную роль. Отсутствие нормативных методов расчета и проектирования крутильных связей сужает доступный для проектировщика выбор конструктивных решений для обеспечения устойчивости изгибаемых элементов, вынуждая вводить в состав стального каркаса дополнительные элементы, роль которых часто оказывается условной. В статье выполнен обзор отечественной и зарубежной литературы по теории расчета на устойчивость балок, раскрепленных крутильными связями. Рассмотрены положения расчета балок со связями на устойчивость, изложенные в действующих зарубежных нормах. Рассмотрены исследования, проведенные в прошлые годы и в настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом. Представлена выборка факторов, которые оказывают наибольшее влияние на эффективность применения крутильных связей для обеспечения устойчивости балок, и обозначены области для дальнейшего развития подходов к расчету и проектированию таких связей. Приведены рекомендации, обобщающие результаты рассмотренных исследований.

Ключевые слова: общая устойчивость, изгибаемые элементы, стальные конструкции, система связей, крутильные связи, вертикальные диафрагмы, поперечные связи.

Введение. Общая устойчивость балок является критерием расчета по первой группе предельных состояний. Несущая способность балки может быть обеспечена рациональным проектированием системы связей. Связевые системы могут быть разделены на две категории: боковые связи и связи кручения. Боковые связи ограничивают поступательное перемещение сжатой полки балки в месте раскрепления, а связи кручения ограничивают поворот относительно продольной оси балки в раскрепляемом сечении. Во втором случае никаких дополнительных раскреплений сжатой полки балки и завязки со связевой систе-

мой каркаса не требуется. Достаточно только попарного объединения соседних балок связями кручения. Данные связи могут представлять собой отдельные конструкции: диафрагмы или поперечные вертикальные связи, объединяющие соседние балки (рис. 1). В то же время роль сплошного раскрепления от кручения могут выполнять железобетонные плиты перекрытий или иные конструкции перекрытий и покрытий при надежном соединении со стальной балкой.

В действующих отечественных нормах [1, 2] отсутствуют указания по расчету балок, раскрепляемых связями кручения, и рекомендации по конструированию связей такого типа.

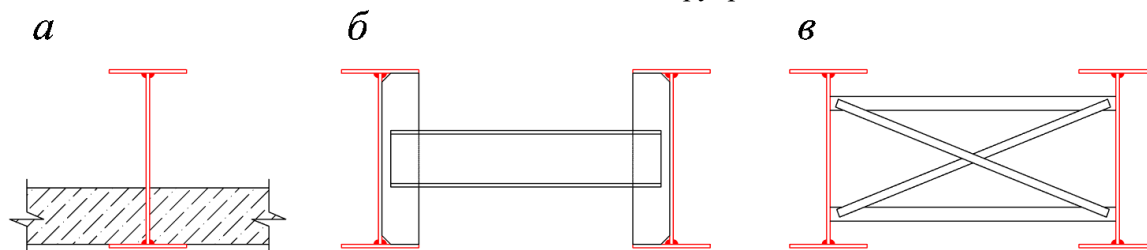


Рис. 1. Различные типы крутильных связей:
а – сплошная, б – диафрагма, в – вертикальная связь

При этом относительно небольшое количество отечественных теоретических и экспериментальных исследований посвящено данной теме. С учетом того, что балочные конструкции, для которых критерий общей устойчивости является определяющим, широко распространены в

стальных каркасах различных зданий и сооружений, мы находим вопрос исследований по данной теме актуальным.

Целью данной статьи является анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы, посвященной применению связей кручения в балочных конструкциях, с целью систематизации практических рекомендаций.

Обзор литературы по теме работы. Исследования, определившие формирование теории расчета стальных балок на общую устойчивость, были проведены в начале XX века С.П. Тимошенко. В работе [3] им было найдено решение задачи по определению критического момента для двух параллельных шарнирноопретых двутавровых балок, скрепленных одной поперечной связью в центре пролета. Рассмотрен случай чистого изгиба балки, изгиба сосредоточенной и равномерно распределенной нагрузкой, а также разные варианты приложения нагрузки по высоте сечения. На основании проделанных вычислений С.П. Тимошенко сделал вывод, что поперечные

$$I_b = \frac{(n^2 - 1)\pi^2}{2n} \cdot \frac{b}{l} \cdot \left(\frac{(n^2 - 1)\pi^2}{l^2} \cdot \frac{h^2}{l^2} \cdot I_y + \frac{1}{2(1 + \nu)} \cdot I_k \right), \quad (1)$$

где n – количество отсеков балки, образованных постановкой диафрагм; b – расстояние между балками в осях, шаг балок; l – общий пролет балки; I_k – момент инерции балки при свободном кручении; I_y – момент инерции балки в плоскости меньшей жесткости; h – высота сечения балки; ν – коэффициент поперечной деформации стали.

Данная формула определяет минимальное значение момента инерции диафрагмы в вертикальной плоскости, при котором она может считаться раскреплением балки из плоскости в месте крепления к этой балке. Для получения выражения (1) Б.М. Броуде ввел следующие допущения: узел соединения диафрагмы и балки принят абсолютно жестким, сечение симметричное, балка подвержена чистому изгибу. Реакция всех связей полагалась одинаковой, что справедливо только для ситуации чистого изгиба, одинаковой жесткости всех диафрагм и равных расстояниях между ними.

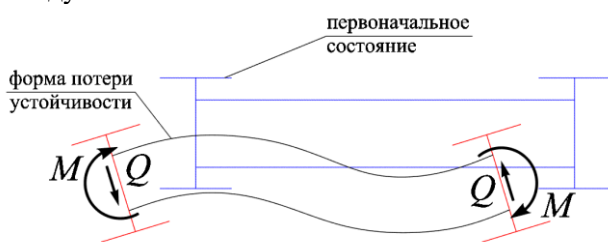


Рис. 2. Схема потери устойчивости 2-х балок, скрепленных связью

Приведенные выше работы представляют собой скорее качественное исследование, которое показывает эффективность использования крутильных связей. В нормах проектирования стальных конструкций 1955 г. [6] результаты данных исследований своего отражения не нашли. В поздней редакции норм [7] в п. 4.17 появилось примечание, допускающее принимать в качестве расчетной длины балки при расчете об-

вязи могут быть эффективно использованы для обеспечения устойчивости балок. При этом влияние связи более выражено для коротких балок. Работа материала стальных конструкций предполагалась упругой, а пластическую работу материала предлагалось учитывать введением соответствующего приведенного модуля упругости.

В последующей работе данная задача была исследована В.З. Власовым [4] в общем виде. Б.М. Броуде, используя это решение, в труде [5] получил выражение требуемого момента инерции поперечной диафрагмы (рис. 2), установленной между двумя параллельными балками, в виде:

щей устойчивости расстояние между поперечными связями, препятствующими повороту сечения балки. При этом никаких расчетных или конструктивных требований к таким связям введено не было. Однако уже в следующей версии СНиП [8] данное примечание было упразднено изменениями [9] и в последующих редакциях норм не появлялось. В дальнейшем отдельные работы, например [10], рассматривали и сопоставляли требования к конструированию связей по отечественным и зарубежным нормам, но практических рекомендаций сформировано так и не было.

В последние годы в нашей стране проводились исследования в развитии методики расчета общей устойчивости балок различными авторами [11, 12], рассматривалась работа связей в покрытиях зданий [13], и были внесены изменения в нормы в части расчета балок на общую устойчивость и требований к связевой системе [14]. Однако применение крутильных связей в объем вышеуказанных исследований не входило, и внесенные изменения никаких рекомендаций по ним не добавили.

Вместе с тем, в отечественной практике по проектированию мостовых конструкций диафрагмы и поперечные связи применяются, но основной их функцией является распределение нагрузок между параллельными главными балками пролетных строений. Поэтому расстояния между ними назначаются исходя из обеспечения эффективного вовлечения соседних конструкций в работу, чему посвящена работа [15], но без рассмотрения вопросов устойчивости. Несмотря на то, что ряд отечественных авторов [16, 17] прямо указывают на влияние диафрагм и поперечных связей на общую устойчивость продольных балок пролетных строений, отечественные нормы по проектированию мостовых конструкций данное явление не учитывают. Строительные правила [18] предписывают рассматривать данные

конструкции в качестве раскреплений только при наличии продольных связей по длине пролетного строения, то есть при включении их в общую связевую систему.

В зарубежных исследованиях основную роль в развитии расчетных методик систем связей балок сыграли работы G. Winter [19], A.C. Taylor & M. Ojalvo [20], J. Yura [21]. В работе [19] впервые был сформирован подход к расчету связей с предъявлением к ним двух типов требований: по жесткостным характеристикам и по несущей способности. Таким образом, связь должна быть достаточно жесткой, чтобы удерживать раскрепляемую конструкцию в стабильном состоянии, и достаточно прочной, чтобы воспринимать возникающее в процессе удержания усилие. В последующих исследованиях этот подход был принят как основополагающий, и расчет всех типов связей был рассмотрен с точки зрения удовлетворения этих двух типов требований. В работе G. Winter в части балок были рассмотрены только боковые связи. Связи кручения были рассмотрены в [20], где за основу были взяты решения В.З. Власова [4] для балки в упругой среде. Рассматриваемая задача представляла собой, как и прежде, две параллельные двутавровые балки симметричного сечения. В работе основной акцент был сделан на случаях сплошного закрепления по длине балки от кручения.

Суть подхода продемонстрирована на примере чистого изгиба. Для этой ситуации авторы получили выражение для критического момента точно такого же вида, как в работе С.П. Тимошенко [3] для нераскрепленной балки, но с учетом работы связей. В обозначениях формулы (1):

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l\gamma} \sqrt{EI_y \cdot GI_\kappa} \left(1 + \frac{\pi^2 a^2}{l^2} + \frac{K_c}{\pi^2} \right), \quad (2)$$

где K_c – безразмерный коэффициент для сплошного раскрепления, определяемый как отношение жесткости этого раскрепления к жесткости раскрепляемой балки при кручении; γ – коэффициент, зависящий от соотношения момента инерции балки в плоскости и из плоскости, для обычных балок равен 1. Как и в [3], эффективность раскрепления рассматривается относительно значения l^2/a^2 , которое зависит от сопротивления кручению двутавровой балки. При $K_c = 0$ выражение (2) упрощается до зависимости, полученной С.П. Тимошенко для нераскрепленных балок. Жесткость узла соединения поперечных связей с балкой, как и в работе [5], принята бесконечной. При этом авторы отмечают, что мини-

мальные требования к жесткости такого раскрепления являются относительно легко достижимыми, что компенсирует возможное влияние податливости узлов. Подобные решения получены для остальных случаев, на основании чего А.С. Taylor сделал вывод об эффективности применения такого рода раскреплений, особенно в области больших значений l^2/a^2 , характерных для длинных балок.

Результаты зарубежных исследований, проведенных в период конца XX века, были обобщены в работе J. Yura [21] в 2001 году. Был сформирован инженерный подход к проектированию связевых систем, который впоследствии был включен в состав американских норм [22]. В рамках этого подхода было предложено, как и в работах G. Winter [19], предъявлять две группы требований к связевым системам – по жесткости и по несущей способности. За основу авторы приняли выражение (2), расширив его применение на случаи с произвольным количеством точек раскрепления балки. При этом к каждой крутильной связи применена сплошная аналогия, то есть ее действие в ходе вычислений заменено жесткостью, эквивалентной сплошному раскреплению балки на рассматриваемом участке. Собственная работа нераскрепленной балки не учитывается, как пренебрежительно малая. Требуемую жесткость поперечной связи (Н·мм/рад) и момент (Н·мм) для расчета ее несущей способности было предложено определять по следующим выражениям:

$$\beta_T^* = \frac{2,4LM_f^2}{nEI_{eff}C_{bb}^2}, \quad (3)$$

$$M_{br} = \frac{0,005LL_bM_f^2}{nhEI_{eff}C_{bb}^2}, \quad (4)$$

где L – общий пролет балки; L_b – расчетная длина балки между точками раскрепления; I_{eff} – приведенный момент инерции балки из плоскости изгиба, для симметричного двутавра $I_{eff} = I_y$; C_{bb} – фактор, учитывающий форму эпюры моментов балки на рассматриваемом участке; M_f – максимальный расчетный момент в пределах длины балки; n – количество связей по длине балки; h – расстояние между центрами тяжести поясов.

В отличие от предыдущих выражений, (3) и (4) учитывают начальные несовершенства в виде исходного угла скручивания балки $\theta = 0,002L_b h$. Для этого требуемая жесткость поперечной связи принимается с двукратным запасом, что уже учтено в вышеприведенных формулах. С

другой стороны, доступная эффективная жесткость системы в целом, которую может обеспечить конструкция, вычисляется по выражению:

$$\frac{1}{\beta_T} = \frac{1}{\beta_b} + \frac{1}{\beta_{\text{sec}}} + \frac{1}{\beta_g}, \quad (5)$$

где β_b , β_{sec} , β_g – это жесткости соответственно самой связи или диафрагмы, стенки балки с учетом поперечных ребер в узле соединения с балкой и собственная жесткость балок, входящих в связевую систему.

Из выражения (5) видно, что эффективная жесткость системы β_T всегда будет меньше, чем наименьшая жесткость среди факторов, учитываемых в правой части уравнения. При этом конструкция в целом должна быть запроектирована таким образом, чтобы выполнялось неравенство:

$$\beta_T \geq \beta_T^* / \varphi, \quad (6)$$

где фактор $\varphi = 0,75$ в соответствии с требованиями норм США [22]. Изложенные положения не распространяются на случаи, когда потеря общей устойчивости сопровождается потерей местной устойчивости полки или стенки, так как в этом случае требования к связям кратно возрастают. Кроме того, рекомендации не применяются в случае сейсмической нагрузки.

Для балок, работающих в пластической стадии, J. Ales и J. Yura было предложено использовать выражения (3)–(6) с заменой расчетного момента M_f на пластический M_p согласно выводам работы [23].

Дальнейшее развитие подходов к проектированию таких связей происходило благодаря исследованиям южнокорейских ученых [24–27], проведенным в 2009–2010 годах. Авторы данных работ фокусировались на уточнении методик по расчету стальных пролетных строений мостов, раскрепленных поперечными диафрагмами, и устранении недостатков, вызванных упрощениями предыдущих исследований. В работах [24, 25] рассмотрены случаи, когда нормы США некорректно определяют требуемую изгибную жесткость диафрагм и предложены уточненные выражения для ее оценки. Установлено, что величина и характер неточности зависит в основном от количества точек раскрепления балки и типа нагрузки. Исследователи связали это с погрешностью концепции эквивалентной жесткости, которая являлась грубым упрощением в описании действительной работы балки. В работе [24] с помощью энергетического метода получены выражения критического момента для балок, подверженных чистому изгибу при произвольном числе крутильных связей в зависимости

от их уровня жесткости. Поскольку J. Yura в своих исследованиях рассматривал балки в упругой стадии работы, то исследованиями [25, 26] детально рассмотрена потеря устойчивости балок с крутильными связями в пластической стадии. Авторы так же учли влияние начальных несовершенств и остаточных напряжений на несущую способность и требования к связям. Для точного выбора сечения диафрагм предложено использовать выражение, полученное в работе [28], определяя сразу момент инерции диафрагмы, как это принято в работе Броуде [5]. Данная формула будет приведена ниже. В работе [26] на примере натурных испытаний проанализирована зависимость несущей способности балок при потере устойчивости в пластической стадии в зависимости от жесткости диафрагм. Работа [27] подводит итог предыдущих исследований и расширяет их решения на произвольные случаи нагружения балок.

Совершенствование нормативных положений по расчету данного типа связей продолжились и в США. В исследовании [29] были рассмотрены случаи раскрепления стержней, имеющих разную степень неупругости при предельной прочности балки. Был сделан вывод, что значение момента в размере 2 % от момента, действующего в балке, оказалось достаточным для проверки сечения диафрагмы по прочности для всех рассмотренных случаев. Выражение (4) было упрощено до вида $M_{br} = 0,02M_f$ и добавлено в актуализированную версию американских норм [30]. Однако в 2019 году в статье [31] были представлены доводы в пользу того, что данное выражение может приводить к переоценке несущей способности крутильных связей. Так, было продемонстрировано, что для сварных балок, имеющих относительно узкие полки и раскрепленных тремя и менее связями, требуемое значение M_{br} может составлять до 6 % от M_f . Данные результаты требуют дополнительного изучения. До тех пор для оценки прочности связей рекомендуется использовать положения предыдущей редакции норм [22].

Похожим образом европейские нормы [32] в приложении ВВ.2.2 содержат указания к назначению минимальной жесткости сплошных крутильных связей, где вращательная жесткость $C_{Q,k}$ выражена как единица вращательной силы на один поворот сечения. Выражение по ее определению своей структурой схоже с (5) и может быть применено для расчета сплошных раскреплений (рис. 1).

Факторы, влияющие на несущую способность по общей устойчивости для балок, раскрепленных крутильными связями.

Изгибная жесткость крутильных связей, жесткость стенки раскрепляемой балки и жесткость системы балок в целом. Как было сказано выше, одним из основных параметров, определяющих несущую способность балки, является собственный момент инерции связи относительно главной оси сечения. Он определяет величину β_b в выражении (5).

Жесткость стенки в месте примыкания диафрагм тоже является влияющим фактором. Поэтому согласно [22] требуемая изгибная жесткость β_{br} может быть определена с учетом β_T из совместного рассмотрения выражений (3)–(5), приведенных ранее:

$$\beta_{br} = \frac{\beta_T}{\left(1 - \beta_T / \beta_{sec}\right)}, \quad (7)$$

$$\beta_T = \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{2,4LM_f^2}{nEI_{eff}C_{bb}^2}, \quad (8)$$

$$\beta_{sec} = \frac{3,3E}{h} \left(\frac{1,5ht_w}{12} + \frac{t_s b_s}{12} \right), \quad (9)$$

где t_w – толщина стенки раскрепляемой балки, остальные величины см. выражения (3) и (4) и рис. 3.

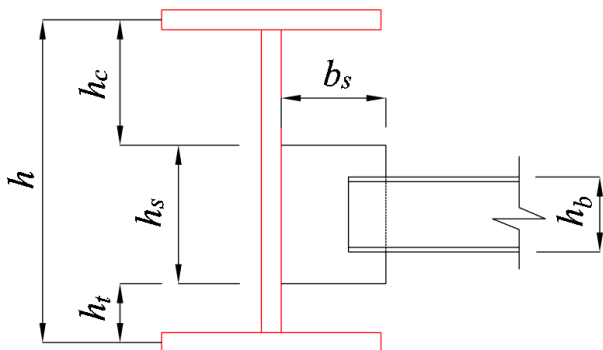


Рис. 3. Параметры узла для определения β_{sec}

Как отмечено в работе [31], нормы США пренебрегают жесткостью β_g , поскольку обычные строительные конструкции, в отличие от мостовых пролетных строений, обычно имеют в своем составе большое количество главных балок. Для случая раскрепления пары балок β_g можно определить по исследованию [21]:

$$\beta_g = \frac{24(n_g - 1)^2 S^2 EI_x}{L^3 n_g}. \quad (10)$$

Когда в качестве раскрепления выступает поперечная вертикальная связь, изгиба стенки не будет, и влиянием β_{sec} можно пренебречь. Далее по формулам [21] определяется требуемый момент инерции диафрагмы, примыкающей по оси главной балки:

$$I_b = \frac{S\beta_{br}}{6E}. \quad (11)$$

В выражениях (10) и (11) S – расстояние между главными балками, n_g – количество скрепляемых главных балок, I_x – момент инерции главных балок относительно главной оси. Ряд работ [24, 25, 27, 28] предлагают уточненные формулы для определения момента инерции диафрагм, которые позволяют оптимальнее подбирать их сечения. Например, для конструкций, состоящих из 2-х и 4-х параллельно расположенных главных балок, в исследовании [25] получена формула:

$$I_b = \frac{S}{k\varphi \left[\frac{(n+1)}{\gamma L} \cdot \frac{E^2 I_{eff} C_{bb}^2}{C_t M_{cr}^2} - \sum \frac{h_i^3}{3h^2 I_{s,eff}} \right]}, \quad (12)$$

где k – параметр, определяемый по форме потери устойчивости балки (2–6); γ – поправочный коэффициент, зависящий от количества связей, $I_{s,eff}$ – момент инерции стенки балки из плоскости, определяемый с учетом ребер жесткости в месте крепления связи; C_t – коэффициент учета уровня приложения нагрузки, принимаемый равным 1 при чистом изгибе или 1,2 при действии поперечной нагрузки; M_{cr} – несущая способность балки по потере устойчивости между связями (Н·мм). Остальные обозначения см. выражения выше. В первом приближении величина момента инерции диафрагм для рассмотренных случаев должна составлять как минимум 1–2 % от момента инерции главной балки.

График зависимости значения критического момента для балки с одиночной связью в центре пролета от жесткости этой связи показан на рис.

4. До значения β_{br} балка теряет устойчивость в целом, по глобальной форме потери устойчивости. При достижении связью требуемого значения жесткости форма потери устойчивости меняется на локальную и обретает вид синусоиды с перегибами в местах примыкания связей. Дальнейшее увеличение жесткости смысла не имеет, так как после значения β_{br} увеличения критического момента не происходит.

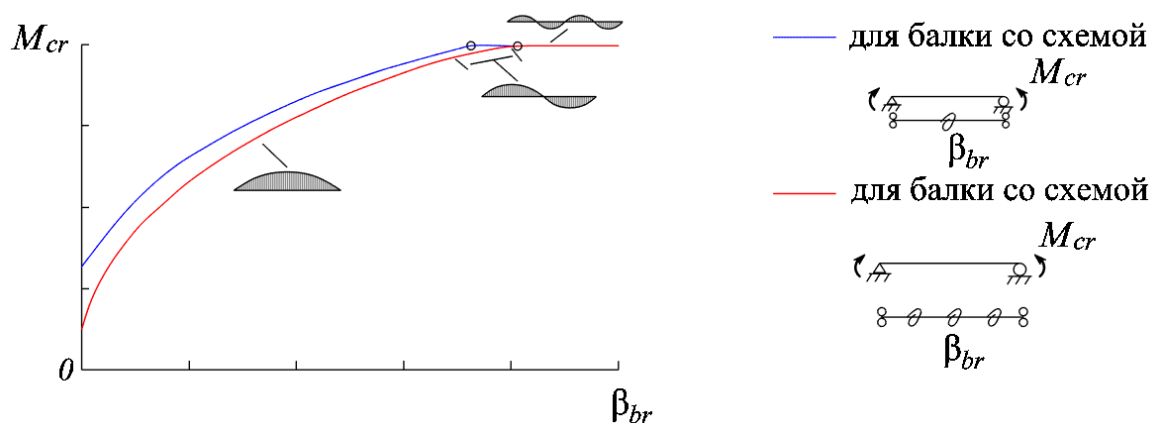


Рис. 4. График зависимости критического момента и формы потери устойчивости от жесткости примыкающих связей (рис. авторов). Данные для графика взяты из [20]

Жесткость узла крепления связи к главной балке. Всеми исследователями была отмечена значительная роль конструктивного решения узла примыкания диафрагм. В большинстве работ данный узел полагался абсолютно жестким. Рассматриваемые конструктивные решения предполагали в основном сварной узел крепления (рис. 3). В том случае, если узел крепления принимается на болтах нормальной точности, податливость болтового соединения должна быть учтена дополнительно введением соответствующего коэффициента в выражение (5). С практической точки зрения это означает, что второстепенные балки каркасов, прикрепляемые типовыми узлами по серии 2.440-2 выпуск 1 «Шарнирные узлы балочных клеток и рамные узлы примыкания ригелей колоннам» потенциально могут выполнять роль крутильных связей, если жесткость болтового соединения, с учетом разности диаметра отверстия и номинального диаметра болта, достигнет определенного минимального значения. Данный вопрос требует дополнительного рассмотрения.

Жесткость поперечных ребер в месте крепления диафрагмы. Выражение (9) предусматривает наличие ребер жесткости. Их постановка в местах раскрепления является важным условием, поскольку в их отсутствие местные деформации стенки могут быть значительными, что приведет к резкому уменьшению значения β_{sec} и падению суммарной крутильной жесткости β_T так, что условие (6) не будет выполнено. Отечественные и иностранные нормы содержат указания по назначению размеров и толщины поперечных ребер, исходя из условия обеспечения местной устойчивости стенки балки. Во всех случаях, рассмотренных в [25], установки ребер по такого рода требованиям оказалось недостаточно

для эффективной работы крутильных связей. Подходов к назначению размеров и толщины ребер, исходя из эффективности связей, в зарубежных работах не предусмотрено. В нормах [22] только содержатся указания, что β_{sec} не должна быть меньше β_T , определяемой по (8).

С другой стороны, в работе [21] отмечается, что для ребер высотой не менее 1/2 высоты стенки при прокатном сечении балки показатель β_{sec} теряет свою значимость, ввиду относительно большей толщины стенки проката по сравнению со сварными балками.

Начальные несовершенства. Несовершенства для задачи с крутильными связями заключаются в назначении сечениям балок начального угла поворота. На проектные требования для крутильных связей балок это влияет так же, как и на требования для связей по колоннам, сформулированные G. Winter в работе [19] – требуемая жесткость должна быть увеличена как минимум вдвое. При невыполнении этого требования деформации будут стремительно наращаться, что приведет к чрезмерным усилиям M_{br} , возникающим в связях. На рис. 5 приведена зависимость увеличения суммарной деформации от увеличения нагрузки до критической для колонны с распоркой в центре высоты из работы [19]. Деформации являются конечными только при двукратном увеличении жесткости. Данное требование, хотя последние исследования [29] и указывают на его неточность, учтено прямым образом в выражениях (3) и (8) в составе коэффициента 2,4 в числителе. Величина начального угла поворота принята в размере $\theta_0 = 0,002L_b / h$.

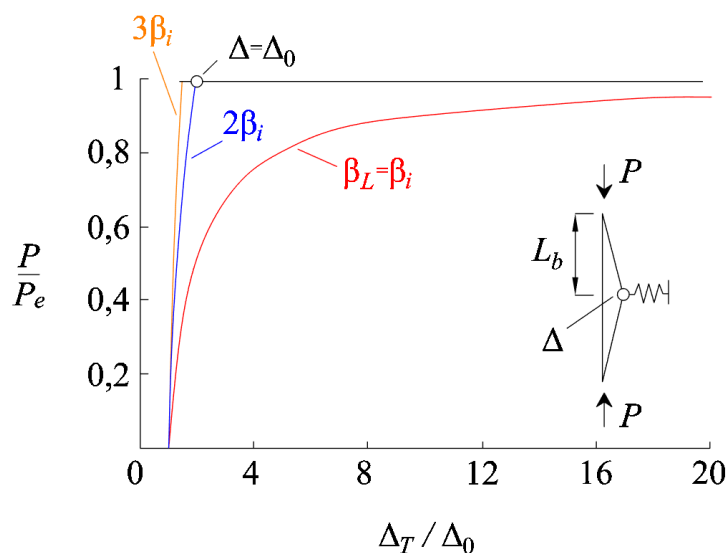


Рис. 5. Сопоставление графиков увеличения деформаций от нагрузки с учетом начального искривления для одинарной, двойной и тройной жесткости упругой связи (рис. авторов). Данные для графика взяты из [16]

Уровень приложения нагрузки по высоте сечения и уровень расположения крутильных связей. В отличие от боковых связей по верхним поясам, для связей кручения эти два фактора не имеют решающего значения. Как показали исследования [21], при смещении нагрузки с центра тяжести балки на верхнюю полку величина критической нагрузки уменьшается не более 20 %. Этот факт учтен в выражении (8) в составе коэффициента 2,4 в числителе дроби. Смещение связей в обратную сторону, ближе к растянутым полкам балок, не уменьшает их эффективности, хотя и несколько снижается жесткость такого раскрепления, что повышает требования к геометрическим характеристикам связей. В этом случае выражение (11) заменяется на:

$$I_b = \frac{S\beta_{br}}{2E}. \quad (13)$$

Количество раскрепляемых балок и соотношение их жесткости. Влияние количества балок на требования к жесткости связей отмечено практически во всех работах. Самая невыгодная ситуация – система из двух балок, поскольку тогда β_g получается минимальным. С увеличением количества балок степень влияния этого показателя снижается. В работе [21] отмечается, что при количестве балок более шести влиянием этого коэффициента можно пренебречь.

В работе [20] указано, что наличие в конструкции балок разной жесткости влияет на несущую способность по общей устойчивости, поскольку связь со стороны более мощной балки сможет создавать реактивный момент большей величины. Однако в действующих иностранных нормах информации об учете или пренебрежении этим явлением найти не удалось, что требует дальнейшего исследования.

Влияние шага связей и соотношения их жесткости. В исследовании [31] отмечено влияние шага связей на величину момента M_{br} в связях. При увеличении количества связей по длине пролета балки от 1 до 3 зафиксировано снижение удельного значения момента на каждую связь. С дальнейшим увеличением количества раскреплений этот эффект проявлялся не так заметно. На удельную величину требуемой жесткости количество связей не влияет. При этом во всех исследованиях рассматриваются диафрагмы одинаковой жесткости, расположенные с одинаковым шагом, обеспечивающие равную степень раскрепления балки.

Влияние типа нагрузки. Для всех исследований характерен общий подход к учету данного фактора. Ключевое решение получено для ситуации чистого изгиба, как самой неблагоприятной, поскольку при этом сжатая полка равномерно сжата по всей длине балки. В иных случаях загрузки сжатая полка оказывается в более выгодных ситуациях, что учитывается в нормах [22] поправочными повышающими коэффициентами по типу выражения (3).

Потеря устойчивости в пластической стадии. Характерна для балок с малыми расчетными длинами. Как отмечено в работе [3], критические напряжения потери устойчивости за пределом пропорциональности могут быть описаны графиком кривой в зависимости от величины гибкости элемента. Для балок данные кривые приведены в европейских нормах [32]. Диаграммы похожего вида приведены в отечественных нормах [2]. В исследованиях [25–27] произведена оценка работы балок с крутильными связями и проведено сопоставление с кривыми потери устойчивости

из [32]. Получена хорошая сходимость результатов численного моделирования и натурных испытаний с аналитическими расчетами с использованием разных диаграмм для соответствующих типов сечений. Отмечается, что важными параметрами для пластической потери устойчивости являются начальные несовершенства и остаточные напряжения. Эпюры распределения последних приняты на основании рекомендации европейских норм и представлены на рис. 6. Установлено, что одновременный учет этих двух факторов в полной мере приводит к недооценке несущей способности, что подтверждается натурными испытаниями [26]. Объем остаточных напряжений, который необходимо учитывать, требует дополнительной исследовательской оценки.

Поведение балки при пластической потере устойчивости отличается от упругой стадии. После перехода материала в состояние текучести жесткость балки снижается, следовательно, требуемая жесткость диафрагмы, при условии ее упругой работы, тоже может быть уменьшена. Также в работе [28] отмечено, что в пластической стадии должна быть учтена собственная несущая способность балки, которой пренебрегалось при выводе выражения (3). Для относительно малых расчетных длин собственный вклад балки в несущую способность конструкции может быть ощутим и должен учитываться при определении требуемого момента инерции диафрагмы по формуле, предложенной в [25, 26]:

$$I_b = \frac{S}{k\varphi \left[\frac{(n+1)}{\gamma L} \cdot \frac{E^2 I_{eff} C_{bb}^2}{C_T (M_{cr}^2 - M_0^2)} - \sum \frac{h_i^3}{3h^2 I_{s,eff}} \right]}, \quad (14)$$

где M_0 – несущая способность нераскрепленной балки по потере устойчивости (Н·мм).

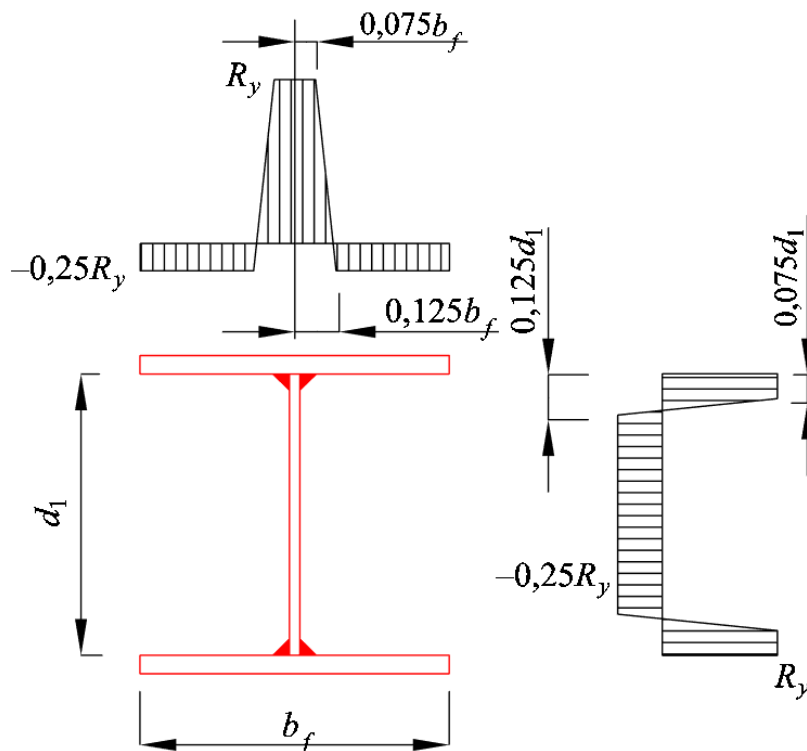


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений в сечении сварной балки (рис. авторов). Данные взяты из [24]

Пластическая работа самих диафрагм в указанных работах не рассматривается и должна быть изучена отдельно.

Влияние формы поперечного сечения диафрагм и схемы решетки вертикальных связей. Данные факторы малоисследованы. В практике для диафрагм в основном применяются

сварные, прокатные двутавры или швеллеры, основной рассматриваемой характеристикой которых является момент инерции относительно главной оси сечения. При этом, например, в машиностроительной области для несущих рам часто применяют замкнутые сечения [33], что улучшает их работу на несимметричную нагрузку.

Необходимо изучить, может ли это быть эффективно использовано в строительстве.

В работе [21] приведены выражения по определению вращательной жесткости β_{br} вертикальной связи в зависимости от типа решетки. Рассмотрены случаи Х- и К-образной связи, для других вариантов выражений не приведено. Поиск наиболее рациональных форм решетки требует дополнительных изысканий, поскольку инженерная практика не ограничивается этими двумя вариантами. К тому же для большого шага балок применение данных решений будет затруднено уменьшением углов примыкания решетки.

Выводы и рекомендации. Действующие отечественные нормы проектирования [1, 2, 18] не содержат указаний по расчету и проектированию поперечных связей балок, несмотря на то что этот вопрос рассматривался отечественными авторами в работах [3–5].

Зарубежные нормы [22, 30, 32] предлагают проектировать данные связи путем назначения им требуемой жесткости и прочности. В качестве требуемой жесткости рассматривается значение, при котором форма потери устойчивости балки приобретает вид синусоиды с перегибами в местах крепления связей. В качестве критерия прочности принимается значение изгибающего момента, возникающего при повороте сечения главной балки в момент потери устойчивости, который воспринимается поперечной связью. Представленные выражения получены на основе концепции эквивалентной жесткости связей на рассматриваемом участке балки.

В работах [24, 27, 29] отмечается погрешность применения подхода, при котором действие отдельно рассматриваемой поперечной связи приравнивается к эквивалентному действию сплошного раскрепления от кручения на рассматриваемом участке балки. Это в некоторых случаях приводит к неверной оценке требуемой жесткости связей. Данный вопрос требует дополнительного рассмотрения.

В работе [31] делается вывод, что выражение по определению требуемого значения момента в связях, которое содержится в действующих зарубежных нормах [30], может в некоторых случаях давать заниженный результат. Требуется дополнительное изучение этого явления с целью получения корректного выражения для данных случаев. До тех пор рекомендуется использовать предыдущую редакцию норм [22].

В работах [25, 26] рассмотрено поведение поперечных связей по балкам, работающим в пластической стадии. Аналитическую оценку несущей способности таких балок предлагается

производить с применением диаграмм деформирования, представленных в [32]. Установлено, что действующие нормы [30] предъявляют завышенные требования к жесткости поперечных связей в пластической стадии работы балок. Предложены уточненные выражения для ее определения. Это требует анализа последующих исследовательских работ, проведенных за последние годы. Для пластической стадии работы двумя важными факторами являются начальные несовершенства и остаточные напряжения. В работе [26] отмечено, что одновременный учет этих явлений в полном объеме приводит к занижению несущей способности балок. Для выявления корректного способа совместного их учета требуется проведение дополнительных исследований.

В статье рассмотрены ключевые факторы, оказывающие влияние на эффективность работы поперечных связей, а также приведены ключевые положения по их проектированию. Кроме того, выявлены неучтенные факторы. В частности, требует изучения возможность прикрепления поперечных связей на болтах нормальной точности и разработка методики учета их податливости. Поскольку во всех работах отмечена важность постановки поперечных ребер в местах крепления связей, необходимо сформулировать требования к назначению их основных параметров, определяющих жесткость соединения. Те требования к ребрам, которые содержатся в действующих отечественных и зарубежных нормах, сформулированы исходя из обеспечения местной устойчивости стенок, и являются менее строгими. Так же требуют рассмотрения ситуации соединения поперечными связями балок различной жесткости, их расположение с переменным шагом и применение самих диафрагм различной жесткости. Необходим анализ оптимального очертания решетчатых связей для различного шага главных балок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II23-81*. М., 2017. 142 с.
2. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования. М., 2017. 167 с.
3. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. Москва/Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1946. 533 с.
4. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 574 с.

5. Броуде Б.М. Предельные состояния балок. Москва; Ленинград: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1953. 216 с.
6. НИТУ 121-55. Нормы и технические условия проектирования стальных конструкций. М., 1955. 72 с.
7. СНиП II-В.3-62. Стальные конструкции. Нормы проектирования. М., 1963. 65 с.
8. СНиП II-В.3-72. Стальные конструкции. Нормы проектирования. М., 1974. 109 с.
9. Пименов И.Л. Новое издание главы СНиП II-В.3-72 «Стальные конструкции. Нормы проектирования» // Металлические конструкции в строительстве. 1973. № 7. С. 37–39.
10. Конаков А.И. Критическая жесткость элементов, раскрепляющих сжатые стержни // Строительная механика и расчет сооружений. 1990. № 5. С. 78–80.
11. Фарфель М.И., Гукова М.И., Святошенко А.Е. Общая устойчивость балок двутаврового постоянного сечения. Развитие расчетных положений // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 1(300). С. 4–13.
12. Galishnikova V.V., Gebre T.H. A comparative study of beam design curves against lateral torsional buckling using AISC, EC and SP // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2019. Vol. 15, № 1. Pp. 25–32.
13. Туснина О.А. Работа связей в покрытии промышленного здания со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 1. С. 37–42.
14. Ведяков И.И., Фарфель М.И., Гукова М.И. О дополнении в СП 16.13330.2017 требований по установке связей // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 5(298). С. 35–40.
15. Семенец Л.В. О назначении количества и жесткости поперечных балок, диафрагм и связей в балочных мостах // Известия высших учебных заведений министерства высшего и среднего специального образования СССР. 1962. № 3. С. 76–83.
16. Протасов К.Г., Теплицкий А.В., Крамарев С.Я., Никитин М.К. Металлические мосты: монография. Москва: Издательство Транспорт, 1973. 352 с.
17. Корнеев М.М. Стальные мосты. Пособие по проектированию в трех томах. Том 2. Второе издание. Киев: Издательство Ультрадрук, 2019. 444 с.
18. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. М., 2011. 346 с.
19. Winter G. Lateral bracing of columns and beams // American society of civil engineers. 1960. № 3044. Pp. 116–135.
20. Taylor C., Ojalvo M. Torsional restraint of lateral buckling // Journal of the structural division. 1966. Vol. 2, № 2. Pp. 115–129.
21. Yura J. Fundamentals of beam bracing // Engineering journal. 2001. № 4. Pp. 11–26.
22. AISC. Steel construction manual. 13th ed. 2005. 670 p.
23. Ales J., Yura J. Bracing design for inelastic structures // The annual stability conference structural stability research council, (April 6–7, 1993). Milwaukee: WI. Pp. 29–37.
24. Nguyen C.T., Moon J., Le V.N., Lee H.E. Lateral-torsional buckling of I-girders with discrete torsional bracings // Journal of constructional steel research. 2009. Vol. 66, № 2. Pp. 170–176.
25. Park Y., Hwang S., Hwang M., Choi B. Inelastic buckling of torsionally braced I-girders under uniform bending: I. Numerical studies // Journal of constructional steel research. 2009. Vol. 66, № 2. Pp. 304–316.
26. Choi B., Park Y. Inelastic buckling of torsionally braced I-girders under uniform bending: II. Experimental study // Journal of constructional steel research. 2010. Vol. 66, №. 8–9. Pp. 1128–1137.
27. Nguyen C.T., Joo H., Monn J., Lee H. Flexural-torsional buckling strength of I-girders with discrete torsional braces under various loading conditions // Engineering structures. 2012. Vol. 36. Pp. 337–350.
28. Nguyen C.T., Lee H.E., Monn J., Park Y. Torsional Stiffness Requirements for Diaphragm Bracing of Discretely Braced I-girders // International journal of steel structures. 2014. Vol. 14, № 2. Pp. 355–368.
29. Prado E., White D.W. Assessment of basic steel I-section beam bracing requirements by test simulation: Thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree master of sciences in civil engineering; School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 2015. 243 p.
30. AISC. Steel construction manual. 16th ed. 2016. 676 p.
31. Yangqing L., Reichenbach M., Helwig T. Torsional brace strength requirements for steel I-girders // Journal of structural engineering. 2019. Vol. 146, № 1. Pp. 1–9.
32. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings. 2005. 91 p.
33. Gawande S.H., Muley A.A., Yerrawar R.N. Optimization of Torsional Stiffness for Heavy Commercial Vehicle Chassis Frame // Automotive innovation. 2018. Vol. 1. Pp. 352–361.

Информация об авторах

Чебыкин Григорий Петрович, аспирант кафедры строительных конструкций и механики грунтов. E-mail: chebyn@yandex.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Беляева Зоя Владимировна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных конструкций и механики грунтов. E-mail: z.v.believa@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Кудрявцев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и механики грунтов. E-mail: s.v.kudryavtsev@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

Поступила 05.05.2024 г.

© Чебыкин Г.П., Беляева З.В., Кудрявцев С.В., 2024

**Chebykin G.P., Beliaeva Z.V., Kudryavtsev S.V.*

Ural Federal University

**E-mail: chebyn@yandex.ru*

ENSURING THE OVERALL STABILITY OF STEEL BEAMS BY TORSIONAL BRACINGS

Abstract. *The current domestic building codes for the design of steel structures do not provide guidance on ensuring the overall stability of beams using torsional bracings. At the same time, the structures of steel frames of buildings and bridges contain elements that could take on this role. The lack of standard methods for designing torsional bracings narrows the choice of design solutions available to the designer to ensure the stability of bending elements, forcing the introduction of additional elements into the steel frame, the role of which is often conditional. The article reviews domestic and foreign literature on the theory of stability calculations for beams braced with torsional braces. The provisions for designing beams with braces for stability, set out in current foreign standards, are considered. Research conducted in past years and currently both in our country and abroad is considered. A selection of factors that have the greatest impact on the effectiveness of using torsional braces to ensure the stability of beams is presented, and areas for further development of approaches to the design of such connections are identified. Recommendations summarizing the results of the reviewed studies are provided.*

Keywords: *general stability, bending elements, steel structures, bracing system, torsional bracing, vertical diaphragms, transverse bracing.*

REFERENCES

1. SP 16.13330.2017. Steel Structures. Moscow, 2017. 142 p. (rus)
2. SP 294.1325800.2017. Steel structures. Design Rules. Moscow, 2017. 167 p. (rus)
3. Timoshenko C.P. Stability of elastic systems [Ustoychivost' uprugikh sistem]. Moscow, Leningrad: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1946. 533 p. (rus)
4. Vlasov V.Z. Thin-walled elastic rods [Tonkostennyye uprugie stержni]. Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1959. 574 p. (rus)
5. Broude B.M. Limit states of beams [Predel'nyye sostoyaniya balok]. Moscow, Leningrad: State Publishing House of Literature on Construction and Architecture, 1953. 216 p. (rus)
6. NTU 121-55. Standards and technical conditions for the design of steel structures. Moscow, 1955. 72 p. (rus)
7. SNiP II-V.3-62. Steel Structures. Design standards. Moscow: Stroyizdat, 1963. 65 p. (rus)
8. SNiP II-V.3-72. Steel Structures. Design standards. Moscow: Stroyizdat, 1974. 109 p. (rus)
9. Pimenov I.L. New edition of SNiP II-V.3-72 chapter "Steel structures. Design standards" [Novoye izdaniye glavy SNiP II-V.3-72 «Stal'nyye konstruktsii. Normy proyektirovaniya»]. Metallicheskiye konstruktsii v stroitel'stve. 1973. No. 7. Pp. 37–39. (rus)
10. Konakov A.I. Critical stiffness of elements bracing compressed rods [Kriticheskaya zhestkost' elementov, raskrepyayushchikh szhatyye stержni]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 1990. No. 5. Pp. 78–80. (rus)

11. Farfel' M.I., Gukova M.I., Svyatoshenko A.Ye. General stability of I-beams of constant section. Development of settlement provisions [Obshchaya ustoychivost' balok dvutavrovogo postoyanogo secheniya. Razvitiye raschetnykh polozheniy]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2022. No. 1(300). Pp. 4–13. (rus)
12. Galishnikova V.V., Gebre T.H. A comparative study of beam design curves against lateral torsional buckling using AISC, EC and SP. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019. Vol. 15, № 1. Pp. 25–32.
13. Tushina O.A. Work of connections in the covering of an industrial building with a steel frame [Rabota svyazey v pokrytii promyshlennogo zdaniya so stal'nyim karkasom]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2019. No. 1. Pp. 37–42. (rus)
14. Vedyakov I.I., Farfel' M.I., Gukova M.I. About the addition to SP 16.13330.2017 of the requirements for establishing connections [O dopolnenii v SP 16.13330.2017 trebovaniy po ustanovke svyazey]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2021. No. 5(298). Pp. 35–40. (rus)
15. Semenets L.V. On the purpose of the number and stiffness of transverse beams, diaphragms and connections in beam bridges [O naznachении kolichestva i zhestkosti poperechnykh balok, diafragma i svyazey v balochnykh mostakh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy ministerstva vysshego i srednego spetsial'nogo obrazovaniya SSSR*. 1962. No. 3. Pp. 76–83. (rus)
16. Protasov K.G., Teplitskiy A.V., Kramarev S.Ya., Nikitin M.K. Steel bridges [Metallicheskiye mosty]. Moscow: Publishing House Transport, 1973. 352 p. (rus)
17. Korneyev M.M. Steel bridges. Design manual in three volumes. Volume 2. Second edition [Stal'nyye mosty. Posobiye po proyektirovaniyu v trekh tomakh. Tom 2. Vtoroye izdaniye]. Kyiv: Ultradruk Publishing House, 2019. 444 p. (rus)
18. SP 35.13330.2011. Bridges and pipes. Moscow, 2011. 346 p. (rus)
19. Winter G. Lateral bracing of columns and beams. American society of civil engineers. 1960. No. 3044. Pp. 116–135.
20. Taylor C., Ojalvo M. Torsional restraint of lateral buckling. *Journal of the structural division*. 1966. Vol. 2, No. 2. Pp. 115–129.
21. Yura J. Fundamentals of beam bracing. *Engineering journal*. 2001. No. 4. Pp. 11–26.
22. AISC. Steel construction manual. 13th ed. 2005. 670 p.
23. Ales J., Yura J. Bracing design for inelastic structures. The annual stability conference structural stability research council, (April 6–7, 1993). Milwaukee: WI. Pp. 29–37.
24. Nguyen C.T., Moon J., Le V.N., Lee H.E. Lateral-torsional buckling of I-girders with discrete torsional bracings. *Journal of constructional steel research*. 2009. Vol. 66, No. 2. Pp. 170–176.
25. Park Y., Hwang S., Hwang M., Choi B. Inelastic buckling of torsionally braced I-girders under uniform bending: I. Numerical studies. *Journal of constructional steel research*. 2009. Vol. 66, No. 2. Pp. 304–316.
26. Choi B., Park Y. Inelastic buckling of torsionally braced I-girders under uniform bending: II. Experimental study. *Journal of constructional steel research*. 2010. Vol. 66, No. 8–9. Pp. 1128–1137.
27. Nguyen C.T., Joo H., Monn J., Lee H. Flexural-torsional buckling strength of I-girders with discrete torsional braces under various loading conditions. *Engineering structures*. 2012. Vol. 36. Pp. 337–350.
28. Nguyen C.T., Lee H.E., Monn J., Park Y. Torsional Stiffness Requirements for Diaphragm Bracing of Discretely Braced I-girders. *International journal of steel structures*. 2014. Vol. 14, No. 2. Pp. 355–368.
29. Prado E., White D.W. Assessment of basic steel I-section beam bracing requirements by test simulation: Thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree master of sciences in civil engineering; School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 2015. 243 p.
30. AISC. Steel construction manual. 16th ed. 2016. 676 p.
31. Yangqing L., Reichenbach M., Helwig T. Torsional brace strength requirements for steel I-girders. *Journal of structural engineering*. 2019. Vol. 146, No. 1. Pp. 1–9.
32. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings. 2005. 91 p.
33. Gawande S.H., Muley A.A., Yerrawar R.N. Optimization of Torsional Stiffness for Heavy Commercial Vehicle Chassis Frame. *Automotive innovation*. 2018. Vol. 1. Pp. 352–361.

Information about the authors

Chebykin, Grigoriy P. Postgraduate student. E-mail: chebyn@yandex.ru. Ural Federal University. Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Beliaeva, Zoia V. PhD. E-mail: z.v.beliaevea@urfu.ru. Ural Federal University. Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Kudryavtsev, Sergey V. PhD. E-mail: s.v.kudryavtsev@urfu.ru. Ural Federal University. Russia, 620002, Ekaterinburg, Mira str., 19.

Received 05.05.2024

Для цитирования:

Чебыкин Г.П., Беляева З.В., Кудрявцев С.В. Обеспечение общей устойчивости стальных балок крутильными связями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №6. С. 43–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-43-55

For citation:

Chebykin G.P., Beliaeva Z.V., Kudryavtsev S.V. Ensuring the overall stability of steel beams by torsional bracings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 43–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-43-55

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-56-64

*Кузнецов И.В.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: elias96@mail.ru

ОЦЕНКА СТРАМПОВ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ УНИВЕРСАЛЬНОГО ДИЗАЙНА

Аннотация. Особенности существующего рельефа в границах города диктуют необходимость проектирования различных элементов организации рельефа, позволяющих связать между собой разные его уровни с целью создания непрерывной пешеходной сети. Наиболее распространёнными вариантами решения этой проблемы являются лестницы и пандусы. Однако требования к их объёмно-планировочным характеристикам позволяют разместить их далеко не в любом городском пространстве, в особенности, если оно имеет определённые планировочные ограничения. В связи с этим возникает необходимость применять различные комбинированные объёмно-планировочные решения, объединяющие в пространстве различные элементы организации рельефа. Помимо практической составляющей такие решения также могут разнообразить общественные городские пространства. В качестве одного из таких решений в некоторых случаях предлагается применять стрампы, которые и являются объектом представленного исследования. Предметом является изучение их объёмно-планировочных характеристик и их соответствия или несоответствия нормативным требованиям, выдвигаемым в рамках концепции «универсального дизайна», путём анализа российской официальной и нормативно-производственной литературы, а также анализа мирового опыта проектирования и строительства. По результатам исследования представляется сводный анализ на предмет соответствия стрампов двум основным требованиям «универсального дизайна» – требованиям доступности и безопасности, а также даются некоторые рекомендации в рамках принципа разумного приспособления.

Ключевые слова: универсальный дизайн, универсальная городская среда, организация универсальной среды, пандус, страмп, требования доступности, принцип разумного приспособления.

Введение. В рамках комплексного благоустройства территорий решается важная задача по взаимосвязи разных уровней существующего рельефа и созданию единой пешеходной сети [1, 2]. Наиболее сложные случаи большого перепада высотных отметок решаются посредством проектирования лестниц и пандусов, позволяющих расширить круг пользователей среды и сделать её доступной и безопасной для подавляющего большинства населения [3, 4]. Однако пространственные площади, занимаемые лестницами и особенно пандусами, которые являются следствием

соблюдения планировочных требований к этим элементам, побуждают искать новые решения по организации рельефа с целью обеспечения доступности и безопасности городской среды, которые соответствовали бы нормам, в том числе российским, охватывающим архитектурно-градостроительную деятельность [2, 5]. Разработка новых и совершенствование уже известных приёмов организации рельефа могут способствовать расширению её круга пользователей, имеющих затруднения в мобильности и восприятии окружающего мира [6, 7].



Рис. 1. Объёмно-планировочные решения организации крутого рельефа с применением лестниц и пандусов: слева – схема генерального плана Воклен Сквер, Монреаль, Канада [Источник: makingmtl.ca/placevaquelin/widgets/6101/photos/2309]; справа – схема генерального плана Калифорнийского университета, Беркли, Калифорния, США [Источник: archdaily.com/870467/lower-sproul-redevelopment-moore-ruble-yudell-architects-and-planners]

В некоторых случаях проходящая часть лестницы пересекается исключительно с разворотными площадками пандуса, которые в свою очередь также выполняют роль промежуточных площадок лестницы, как, например, в комплексе Калифорнийского университета в Беркли, США [8] или на Воклен Сквер (Place Vauquelin) в Монреале, Канада (рис. 1). В других же случаях интеграция конструкций лестницы и пандуса между собой происходит куда глубже. В качестве планировочного решения в отдельных случаях на практике предлагается применять так называемый страмп (от англ. stairs – лестница и ramp – пандус), представляющий собой единый объёмно-пространственный элемент среды, объединяющий в себе лестницу и пандус. С постепенно возрастающим интересом к такому решению в городской среде возникает необходимость его оценки с позиций концепции «универсального дизайна» в целях устойчивого развития современного общества и городских территорий вместе с ним [9, 10]. Первоочередной представляется задача по оценке такого решения с точки зрения доступности и безопасности.

Степень разработанности темы исследования обуславливается научными изысканиями таких учёных как д-р арх. Степанов В.К., канд. арх. Терягова А.Н., канд. арх. Лазовская Н.А., канд. арх. Мазаник А.В., канд. техн. наук Власюк Т.А., Привезенцева С.В. и др., а также специалистов из стран Европы (например, Ольдани Дж., Гил-Масталерчик Дж. и др.), Азии (например, Сен Д., Юседаг Ч. и др.), Австралии (например, Хендерсон-Уилсон К. и др.) и др., которые уделяли и уделяют своё внимание изучению принципов «универсального дизайна» и формулировке собственных тезисов, а также предложений по корректировке решений в городской среде, доступной всем категориям пользователей. Однако, несмотря на повышенный интерес в академическом сообществе к этой теме, конкретное средовое решение, а именно – страмп, остаётся недостаточно изученным, в то время как на практике оно начинает применяться всё чаще. Изучение объёмно-пространственных характеристик стрампа должно обосновать применимость стрампов в качестве мероприятия по доступу людей с инвалидностью и иных маломобильных групп населения.

Целью исследования является обоснование возможности применения стрампов в городской среде в качестве мероприятия по доступу маломобильных групп населения. Для достижения цели были поставлены 2 задачи: во-первых, про-

анализировать опыт проектирования и строительства стрампов, а, во-вторых, оценить объёмно-пространственное решение на предмет соответствия требованиям универсального дизайна на примере российской нормативной литературы, в частности СП 59.13330.2020. Объектом исследования являются стрампы, как решение организации рельефа. Предметом – анализ объёмно-планировочных характеристик стрампов на предмет их соответствия требованиям доступности и безопасности.

Методы, оборудование, материалы. Эволюция развития мысли в области применения стрампов в городской среде как решения проблемы, во-первых, значительного перепада высот рельефа, а, во-вторых, обеспечения доступа маломобильных групп населения и организации универсальной городской среды, представлена посредством ретроспективного анализа мирового опыта проектирования и строительства открытых общественных пространств. Для исследования объёмно-планировочных решений стрампов на предмет их соответствия требованиям, выдвигаемым в рамках концепции «универсального дизайна», был проведён анализ российской нормативной документации, регулирующей строительство, ориентированное в том числе на маломобильные группы населения, в частности в СП 59.13330.2020.

Основная часть.

1. Мировой опыт включения в городскую среду стрампов. Первым известным примером включения стрампа в городское общественное пространство является Робсон Сквер (Robson Square) в Ванкувере, Канада (рис. 2). Проект был предложен в 1974 году архитектором Артуром Эриксоном и ландшафтным архитектором Корнелией Оберландер и реализован к 1982 году [11]. Площадь расположена в оживлённом районе Даунтаун (Downtown Vancouver) на границе с районом Вест Энд (West End) в границах улиц Хорнби-стрит (Hornby Street), Вест-Джорджия-стрит (West Georgia Street), Хай-стрит (Howe Street) и Нельсон-стрит (Nelson Street). Основная рекреационная зона площади расположена между зданием суда (Vancouver Law Courts) и зданием художественной галереи (Vancouver Art Gallery) и ограничена улицами Смит-стрит (Smithe Street) с юго-запада и Робсон-стрит (Robson Street) с северо-востока. Здесь же расположен объект исследования – страмп, объединяющий пространство Сункен Плаза (Sunken Plaza), являющееся нижним уровнем Робсон Сквер, с её верхним уровнем.

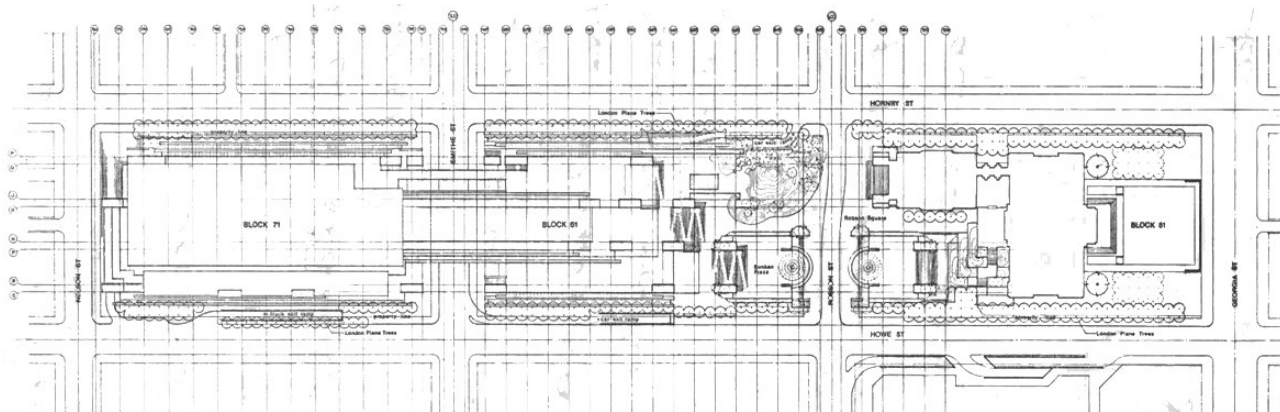


Рис. 2. Схема генерального плана Робсон Сквер, Ванкувер, Канада
[Источник: cca.qc.ca/en/search/details/collection/object/447661]

Страмп оборудован непрерывным поручнем вдоль подпорной стенки и локальными опорами на удалении от неё. Кроме того, поверхность марша пандуса утоплена относительно проступей ступеней, что можно расценивать как формирование колёсоотбойного бортика. Несмотря на заверения руководства фонда Артура Эриксона о том, что архитектор ставил перед собой задачу спроектировать доступное и комфортное общественное пространство [12], страмп на Робсон Сквер активно критикуется общественностью, а также специалистами по вопросам доступности городской среды, которые предлагают его реконструировать [13]. Однако решений, удовлетворяющих всех, пока не предложено. Необходимо отметить, что связь разных уровней общественного пространства обеспечивают лифты, которыми оборудована площадь и здания, расположенные на ней.

Другим примером можно назвать объёмно-планировочное решение Пионер Коурхаус Сквер (Pioneer Courthouse Square) в Портленде, штат Орегон, США (рис. 3). Проект был разработан коллективом авторов во главе с архитектором и дизайнером Уиллом Мартином и ландшафтным архитектором Дугласом Мейси в 1984 году. Общественное пространство занимает целый квартал в Юго-Западном районе города (Southwest) и ограничено улицами Ямхилл-стрит (Yamhill Street), Бродвей (Broadway), Моррисон-стрит (Morrison Street) и 6-ой авеню (6th Avenue). Площадь представляет собой полуциркульный амфитеатр с лестницей, объединённой с пандусом. Пространство благоустроено фонтаном и контейнерным озеленением, а площадь внутри амфитеатра используется в качестве площадки для проведения фестивалей и выставок. Пандус стрампа имеет ширину, достаточную для комфортного использования, в том числе людьми с детскими колясками. Утопленный относительно проступей амфитеатра марш пандуса, образует альтерна-

тиву колёсоотбойным бортикам, однако вся конструкция стрампа не имеет никаких ограждений и поручней: ни вдоль марша пандуса, ни вдоль подпорной стенки, отграничивающей амфитеатр от фонтана. Кроме того, пандус оборудован дренажными решётками, отверстия которых параллельны основному направлению движения по пандусу, что может препятствовать использованию пандуса людьми, использующими колёсные средства передвижения (кресла-коляски, детские коляски и проч.). Однако, несмотря на то, что страмп амфитеатра на Пионер Коурхаус Сквер нельзя считать универсальным решением с позиций доступности и безопасности, следует отметить, что разные уровни площади связаны между собой по её периметру тротуаром с продольным уклоном, обеспечивающим универсальность использования пространства.

Одним из последних примеров применения стрампа в российской практике является участок Болотной набережной в Москве, примыкающий к ГЭС-2 (рис. 4). Однако, следует обратить внимание, что, несмотря на приемлемую ширину пандуса, плоскость марша не утоплена относительно проступей ступеней, что увеличивает вероятность смещения (соскальзывания) ноги человека, трости или колёс кресла-коляски или детской коляски за пределы прохожей части пандуса. Описанное решение не позволяет считать реализованную среду в достаточной мере безопасной для её пользователей. Кроме того, марши пандуса, хоть и разделены промежуточными площадками, расположены вдоль одной оси, а это создаёт вероятность постепенного увеличения скорости передвижения пользователя, пользующегося колёсным средством передвижения, вследствие чего возникает риск незаблаговременного торможения по окончании последнего марша пандуса. Страмп не оборудован ограждениями и поручнями, что не в полной мере отвечает требованиям доступности и безопасности.

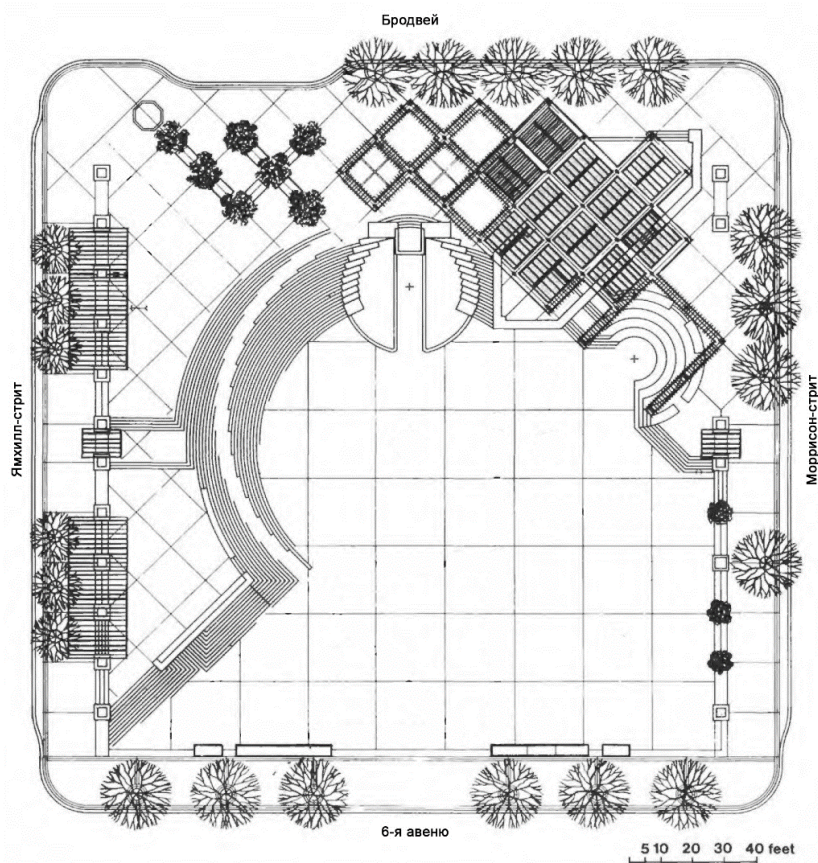


Рис. 3. Схема генерального плана Пионер Коурхаус Сквер, Портленд, штат Орегон, США
[Источник: archives.pdx.edu/ds/psu/15183]

В региональной российской практике проектирования общественных пространств страмп был реализован, например, на территории Сада баланса рядом с филиалом Третьяковской галереи в Самаре, расположившемся в здании бывшей фабрики-кухни завода имени А.А. Масленникова (арх. Е.Н. Максимова, 1930–1932 гг., в настоящее время – ОКН (памятник градострои-

тельства и архитектуры) федерального значения). Весомым недостатком этого решения опять же является отсутствие физического препятствования смещению ноги или вспомогательных средств передвижения за пределы марша пандуса. Кроме того, страмп не продублирован нормативным пандусом, подъёмной платформой или пассажирским лифтом, что снижает степень универсальности данного участка среды.

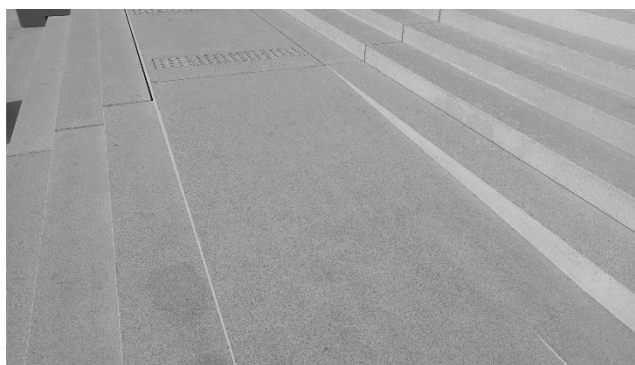
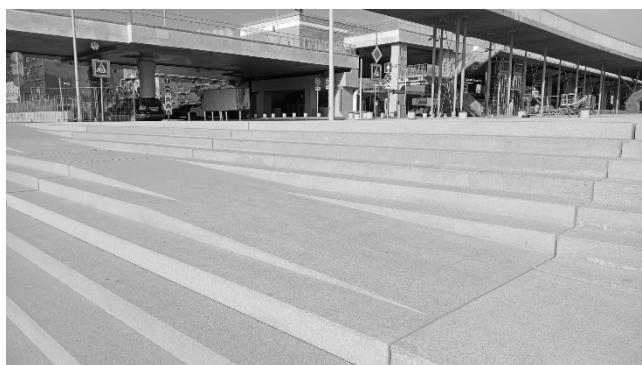


Рис. 4. Страмп на Болотной набережной, Москва, Россия (фото автора статьи)

2. Соответствие решений стрампов требованиям «универсального дизайна» о доступности и безопасности. Для того, чтобы иметь право называться универсальной, городская среда должна отвечать 4 основным требованиям: до-

ступность, безопасность, информативность, комфортность [2, 14, 15, 16]. В рамках исследования объёмно-планировочного решения стрампов была дана оценка по их соответствию требованиям доступности и безопасности.

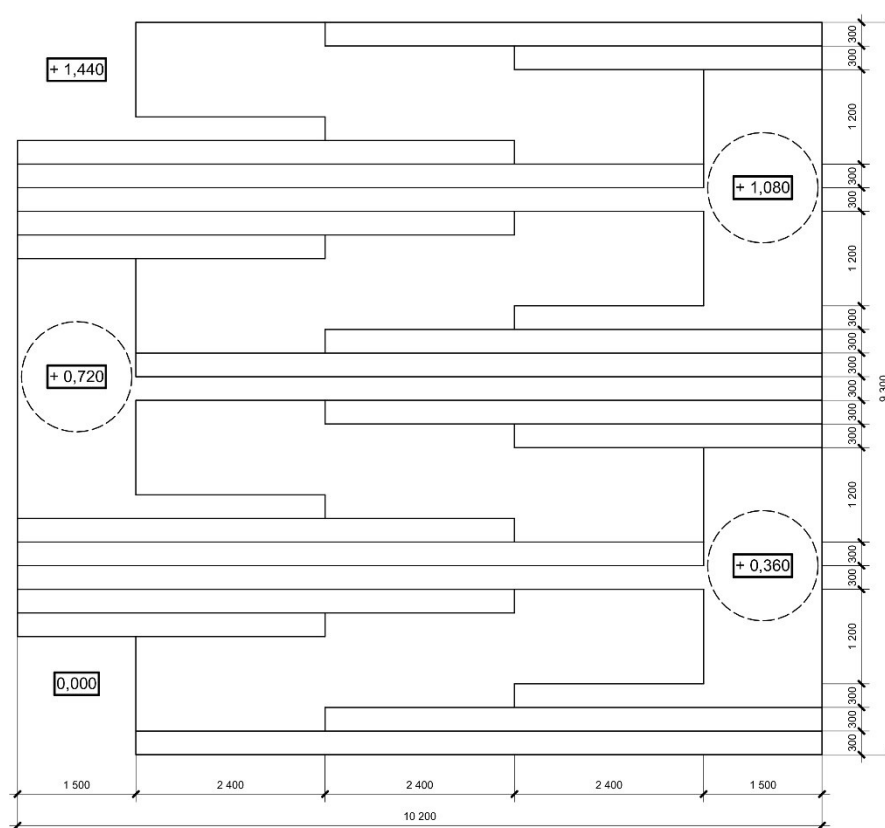


Рис. 5. Схема стрампа с ориентировочными габаритами, пунктирной окружностью обозначен диаметр самостоятельного разворота человека, передвигающегося на кресле-коляске (схема автора статьи)

Для создания доступной среды при проектировании пандуса требуется соблюдать такие требования, как максимально допустимый уклон марша, допустимая ширина марша (в чистоте), габариты промежуточных площадок, обеспечивающих возможность поворота и разворота на кресле-коляске, наличие поручней с возможностью непрерывной опоры [2, 3]. Для обеспечения безопасности требуется спроектировать безопасный уклон маршей пандуса, а также оснастить его ограждением и колёсоотбойными бортиками, играющими в то же время роль тактильного информатора. Нормативный уклон, удовлетворяющий и требованиям доступности, и требованиям безопасности, соблюсти можно за счёт зигзагообразного (или диагонального) объёмно-планировочного решения, когда высотные отметки верхней и нижней части пандуса (первой и последней ступеней лестницы стрампа) будут находиться на значительном расстоянии друг от друга (рис. 5). Нормативную ширину марша пандуса и габариты площадок также возможно реализовать за счёт профиля лестницы. Значительные трудности и ограничения возникают при проектировании ограждений и непрерывных поручней, которыми должны быть оборудованы как лестницы, так и пандусы. При объёмно-планировочном решении стрампа не представляется возможным оборудовать пути движения его пользователей

непрерывными поручнями, в противном случае они будут преграждать эти пути движения. В качестве решения существующей проблемы поручни могут быть установлены вдоль боковых границ стрампа (подпорных стенок и т.п.), а также на ширине лестничного марша стрампа, не пересекающегося с пандусом (в месте промежуточных площадок). Пандус стрампа оборудовать непрерывными ограждениями и поручнями не представляется возможным по обозначенной выше причине, однако в качестве альтернативы ограждению марш пандуса стрампа может быть оборудован по своим краям оградительными столбиками, не препятствующими движению пешеходов по лестнице. Данное решение имеет шанс отвечать принципу разумного приспособления, провозглашённого в Конвенции ООН о правах инвалидов (2006). Роль колёсоотбойных бортиков, препятствующих смещению (соскальзыванию) ноги человека, индивидуальных средств реабилитации (костылей, трости, ходунков и проч.) или колёс технических средств (кресла-коляски, детской коляски, роллатора и проч.) за пределы проходной части пандуса, в какой-то степени может выполнять вертикальная плоскость ступени, образующаяся в случае, если плоскость марша пандуса заглублена относительно поверхностей ступеней (рис. 6).

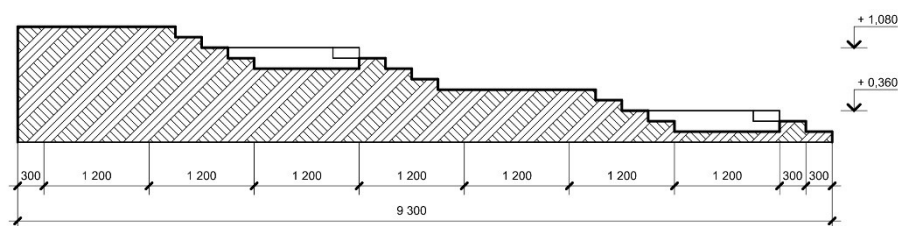


Рис. 6. Разрез стрампа, плоскость марша пандуса утоплена относительно ступеней лестницы (схема автора статьи)

Важной особенностью стрампа является то, что он предназначен для всех пользователей среды, а значит, безопасность использования должна быть обеспечена всем. На фоне этого могут возникнуть противоречия, касающиеся, например, расположения марша пандуса относительно ступеней лестницы. В случае, если поверхность марша заглубляется относительно

проступей, что обеспечивает создание колёсоотбойного бортика, возникает угроза для горожан, использующих не пандус, а лестницу, так как на их пути возникают неровности, о которые можно споткнуться. Кроме того, климатические условия разных стран и городов подразумевают обильные осадки в разные периоды года, которые могут существенно повлиять на качество поверхности проходной части стрампа.



Рис. 7. Схема оценки стрампа на предмет соответствия требованиям «универсального дизайна» о доступности и безопасности (схема автора статьи)

Пользователи той среды, в формировании которой играют роль в том числе и стрампы, выражают свою озабоченность ограниченным соответствием (или полным несоответствием) такого объёмно-планировочного решения требованиям доступности и безопасности [13]. Так как объёмно-планировочное решение стрампа в полной мере не отвечает этим требованиям (рис. 7), они могут применяться лишь как вспомогательный элемент организации рельефа, требующий обязательного дублирования подъёмной платформой или лифтом, которые обеспечили бы доступность и безопасность при эксплуатации среды всеми её пользователями.

С другой стороны, неординарное архитектурное решение, пространственная интеграция двух различных элементов (лестницы и пандуса) в один (страмп), частичная экономия дефицитного городского пространства, объясняемая этой интеграцией, объединение путей движения всех горожан в единый маршрут и отсутствие про-

странственной и социальной сегрегации по какому бы то ни было признаку делает такое решение, как страмп, ярким примером, иллюстрирующим принцип разумного приспособления.

Выводы. Официальная и нормативно-производственная литература в России не включает в себя понятие стрампа, однако оно встречается в различных методических руководствах, таких как, например, «Стандарт комплексного развития территорий», разработанный Минстроем России при участии фонда «ДОМ.РФ» и консалтингового бюро «Стрелка». Кроме того, такое решение встречается на практике при ландшафтном проектировании открытых общественных пространств, в связи с чем возникает потребность в детальном анализе таких решений с точки зрения требований, предъявляемых к универсальной городской среде. Анализ на соответствие российским нормам в области доступности городской среды маломобильным группам населения показывает, что все требования доступности и безопасности, предъявляемые к элементам

среды, в объёмно-планировочном решении стрампов выполнить не представляется возможным, а значит, при проектировании их в городской среде для организации универсального пространства необходимо дублировать их иными элементами (пандусами, подъёмными платформами, пассажирскими лифтами). В то же время, с целью привнесения разнообразия в городскую среду и вариативности её использования стрампы имеют право на существование и требуют разработки планировочных рекомендаций по проектированию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилина Н.В., Привезенцева С.В. Разработка планировочного решения пешеходно-коммуникационного каркаса в транспортно-пересадочных узлах с учетом организации движения маломобильных групп граждан // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. №4(37). С. 118–123. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.17.
2. Терягова А.Н. Цифровой двойник доступной городской среды в рамках социально-пространственной концепции «Здоровый город» // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12. №3(48). С. 163–169. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.23.
3. Иванова О.Г., Копьёва А.В., Масловская О.В., Стрикаускас Л.В., Храпко О.В. Универсальный дизайн озеленённых общественных пространств: монография. Владивосток: Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 2021. 152 с.
4. Матовникова Н.Г., Болдырева М.Р., Сакс Е.В. Проблемы проектирования лестниц и пандусов в парковой зоне // Проблемы современной науки и образования. 2021. №5-2(162). С. 79–82.
5. Долинская В.В., Долинская Л.М. Требования безбарьерной среды в строительстве в источниках права // Законы России: опыт, анализ, практика. 2016. №10. С. 68–73.
6. Кривуц С.В., Катриченко К.А. Дизайн-организация городского пространства для лиц с ограниченными физическими возможностями // Вестник Харьковской государственной академии дизайна и искусств. 2016. №5. С. 33–36.
7. Кольчугин Д.Ю., Прядко И.П. Проблема создания безбарьерного архитектурно-планировочного пространства для маломобильных категорий населения: российский и зарубежный опыт // Экономика и предпринимательство. 2018. № 1(90). С. 1046–1049.
8. Терягова А.Н. Доступный кампус. Опыт создания безбарьерной среды // Innovative Project. 2016. Т. 1. №3(3). С. 74–77. DOI: 10.17673/IP.2016.1.03.14.
9. Жоголева А., Тюрин А., Ким А. Универсальный дизайн // Архитектура и строительство России. 2018. №4(228). С. 46–49.
10. Vavilova T.Ya., Zhdanova I.V., Bakhareva Yu.A., Kayasova D.S. Barrier-free Environment as an Indicator of Sustainable Development of the City. Priorities and Experience in Samara (Russia) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 753. 022032. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022032.
11. Кривенко Е.А. Особенности зарубежного опыта реабилитации городского пространства // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: материалы всероссийской научной конференции с международным участием. Москва: Перо, 2016. С. 25–30.
12. Joyner S. Battle over "stramp" accessibility upgrades in British Columbia takes shape. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: archinect.com/news/article/150156501/battle-over-stramp-accessibility-upgrades-in-british-columbia-takes-shape (дата обращения 05.03.2024).
13. Johnston J. The Robson Square steps are beautiful but are they safe? [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: cbc.ca/news/canada/british-columbia/robson-square-accessibility-1.5255477 (дата обращения 05.03.2024).
14. Терягова А.Н. Безбарьерная городская среда. Основы архитектурно-градостроительного проектирования: учебное пособие. Самара: Офорт, 2010. 154 с.
15. Arora S., Deshpande A. Inclusive Design—Designing Barrier-Free Public Spaces // Design for Tomorrow. 2021. Vol. 1. Pp. 133–146. DOI: 10.1007/978-981-16-0041-8_12.
16. Verma P. Inclusive Megacities: Civil Engineering Strategies for Diverse and Accessible Urban Environments // Sunshine Agriculture: e-Newsletter. 2023. Vol. 3. No. 12. Pp. 33–34.

Информация об авторах

Кузнецов Илья Вячеславович, преподаватель кафедры градостроительства, аспирант кафедры градостроительства. E-mail: elias96@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26.

Поступила 12.04.2024 г.

© Кузнецов И.В., 2024

Kuznetsov I.V.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

E-mail: elias96@mail.ru

EVALUATING STRAMPS FOR COMPLIANCE WITH UNIVERSAL DESIGN REQUIREMENTS

Abstract. The peculiarities of the existing relief within the city boundaries dictate the need to design various elements of relief organisation, allowing to connect its different levels in order to create a continuous pedestrian network. The most common solutions to this problem are stairs and ramps. However, the requirements to their volumetric and planning characteristics do not allow them to be placed in every urban space, especially if it has certain planning restrictions. In this connection there is a need to apply various combined volume-planning solutions, combining in space various elements of relief organisation. Apart from the practical component, such solutions can also diversify public urban spaces. As one of such solutions in some cases it is proposed to apply stramps, which are the object of the presented research. The subject is the study of their volume-planning characteristics and their compliance or non-compliance with the normative requirements of the concept of «universal design» by analysing the Russian official and normative-production literature, as well as by analysing the world experience of design and construction. Based on the results of the study, a summary analysis is presented on the compliance of straps with the two main requirements of «universal design» – the requirements of accessibility and safety, and some recommendations are given within the framework of the principle of reasonable accommodation.

Keywords: universal design, universal urban environment, organisation of universal environment, ramp, stramp, accessibility requirements, principle of reasonable accommodation.

REFERENCES

1. Danilina N.V., Privezentseva S.V. Development of a planning decision of pedestrian communication frame in transport hubs taking into account the organization of the movement of people with limited mobility [Razrabotka planirovochnogo reshenija peshehodno-kommunikacionnogo karkasa v transportno-peresadochnyh uzлах s uchetom organizacii dvizhenija malomobil'nyh grupp grazhdan]. Urban construction and architecture. 2019. Vol. 9. No. 4(37). Pp. 118–123. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.17. (rus)
2. Teryagova A.N. Digital twin of accessible urban environment in the framework of the “Healthy city” socio-spatial concept [Cifrovoy dvojniki dostupnoj gorodskoj sredy v ramkah social'no-prostranstvennoj koncepcii "Zdorovyj gorod"]. Urban construction and architecture. 2022. Vol. 12. No. 3(48). Pp. 163–169. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.23. (rus)
3. Ivanova O.G., Kopyova A.V., Maslovskaya O.V., Strikauskas L.V., Khrapko O.V. Universal design of green public spaces: a monograph [Universal'nyj dizajn ozelenjonnyh obshchestvennyh prostranstv: monografija]. Vladivostok: Vladivostok state university of economics and service, 2021. 152 p. (rus)
4. Matovnikova N.G., Boldyreva M.R., Saks E.V. Problems of designing stairs and ramps in the park area [Problemy proektirovaniya lestnic i pandusov v parkovoj zone]. Problems of modern science and education. 2021. No. 5-2(162). Pp. 79–82. (rus)
5. Dolinskaya V.V., Dolinskaya L.M. Requirements of barrier-free environment in construction and sources of law [Trebovaniya bezbar'ernoj sredy v stroitel'stve v istochnikah prava]. Russian laws: experience, analysis, practice. 2016. No. 10. Pp. 68–73. (rus)
6. Kryvuts S.V., Katrichenko K.A. Design organization of urban space for physically challenged people [Dizajn-organizacija gorodskogo prostranstva dlja lic s ogranichenymi fizicheskimi vozmozhnostjami]. Bulletin of the Kharkiv state academy of design and arts. 2016. No. 5. Pp. 33–36. (ukr)
7. Kolchugin D.Yu., Pryadko I.P. The problem of creating a barrier-free architectural and planning space for low-mobility categories of the population: Russian and foreign experience [Problema sozdaniya bezbar'ernogo arhitekturno-planirovochnogo prostranstva dlja malomobil'nyh kategorij naselenija: rossijskij i zarubezhnyj opyt]. Journal of economy and entrepreneurship. 2018. No. 1(90). Pp. 1046–1049. (rus)
8. Teryagova A.N. Accessible campus. Experience in creating barrier-free environment [Dostupnyj kampus. Opyt sozdaniya bezbar'ernoj sredy]. Innovative Project. 2016. Vol. 1. No. 3(3). Pp. 74–77. DOI 10.17673/IP.2016.1.03.14. (rus)
9. Zhogoleva A., Tyurin A., Kim A. Universal design [Universal'nyj dizajn]. Architecture and construction of Russia. 2018. No. 4(228). Pp. 46–49. (rus)
10. Vavilova T.Ya., Zhdanova I.V., Bakhareva Yu.A., Kayasova D.S. Barrier-free Environment as an Indicator of Sustainable Development of the City.

Priorities and Experience in Samara (Russia). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 753. 022032. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/2/022032.

11. Krivenko E.A. Peculiarities of foreign experience in rehabilitation of urban space [Osobennosti zarubezhnogo opyta reabilitacii gorodskogo prostranstva]. Modern state, problems and prospects of development of branch science: materials of the All-Russian scientific conference with international participation. Moscow: Pero, 2016. Pp. 25–30. (rus)

12. Joyner S. Battle over "stramp" accessibility upgrades in British Columbia takes shape. [Electronic resource]. Access mode: URL: architect.com/news/article/150156501/battle-over-stramp-accessibility-upgrades-in-british-columbia-takes-shape (circulation date 05.03.2024).

13. Johnston J. The Robson Square steps are beautiful but are they safe? [Electronic resource].

Access mode: URL: cbc.ca/news/canada/british-columbia/robson-square-accessibility-1.5255477 (circulation date 05.03.2024).

14. Teryagova A.N. Barrier-free urban environment. Fundamentals of architectural and urban planning design: textbook [Bezbar'ernaja gorodskaja sreda. Osnovy arhitekturno-gradostroitel'nogo proektirovanija: uchebnoe posobie]. Samara: Ofort, 2010. 154 p. (rus)

15. Arora S., Deshpande A. Inclusive Design—Designing Barrier-Free Public Spaces. Design for Tomorrow. 2021. Vol. 1. Pp. 133–146. DOI: 10.1007/978-981-16-0041-8_12.

16. Verma P. Inclusive Megacities: Civil Engineering Strategies for Diverse and Accessible Urban Environments. Sunshine Agriculture: e-Newsletter. 2023. Vol. 3. No. 12. Pp. 33–34.

Information about the authors

Kuznetsov, Ilia V. Lecturer of the Urban Planning Chair, Postgraduate Student of the Urban Planning Chair. E-mail: elias96@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hwy., 26.

Received 12.04.2024

Для цитирования:

Кузнецов И.В. Оценка стрампов на соответствие требованиям универсального дизайна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 56–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-56-64

For citation:

Kuznetsov I.V. Evaluating stramps for compliance with universal design requirements. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 56–64. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-56-64

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-65-75

^{1,*}Хмельва Е.В., ²Сафаргалеев А.В.¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет²Северо-Западный институт управления – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации»

*E-mail: x-tam@mail.ru

УСТАНОВЛЕНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДРОБНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОН В ГЕНЕРАЛЬНЫХ ПЛАНАХ КРУПНЫХ ГОРОДОВ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО НОВГОРОДА, ПЕРМИ И ТЮМЕНИ

Аннотация. В статье рассматривается реализация Генеральных планов городов в части параметров планируемого развития функциональных зон с целью выявления наиболее реализуемых показателей. Проведён анализ 17 городов России и выделены основные параметры, применяемые в российской практике. Более подробно рассмотрены крупные города, имеющие в своих Генеральных планах набор параметров, близких к регламентам Правил землепользования и застройки, и срок реализации которых подошёл к концу в 2024 году: Нижний Новгород, Пермь, Тюмень. Проанализирована реализация назначенных параметров плотности, высотности, застроенности, озеленённости, процента коммерческих функций внутри жилой застройки с помощью геоинформационных систем. Это особенно важно в связи с появлением нового документа в градостроительной практике, объединяющего Генеральный план и Правила землепользования и застройки. Рассмотрен международный опыт в сфере градорегулирования, в том числе в Китае, Бразилии, Индии, в Соединённых штатах Америки, и проведены аналогии с российской практикой. В исследовании собиралось и использовалось множество данных из различных открытых источников, таких как Фонд ЖКХ, Wikimapia, утверждаемые части и материалы по обоснованию Генеральных планов городов, Open Street Map. Геоаналитика производилась на языке программирования Python.

Ключевые слова: реализация Генерального плана, функциональное зонирование, плотность застройки, озеленённость, застроенность.

Введение. С момента принятия первого Градостроительного кодекса в 1998 г. прошло уже более 25 лет, и состав документов территориального планирования, а именно Генеральных планов, значительно изменился. Всё больше требований выдвигается к электронным слоям документа с целью корректного ведения информационных систем градостроительной деятельности (ИСОГД) и их публичной демонстрации. С принятием в 2023 г. Приказа Минэкономразвития № 10 и внесением изменений в Градостроительный кодекс (№ 541-ФЗ от 19.12.2022 статья 28.1) Генеральный план и Правила землепользования и застройки могут быть единым документом, а отображение параметров функциональных (ФЗ) и территориальных зон (ТЗ) в ИСОГД становится обязательным. Кроме стандартной площади зоны, в список устанавливаемых параметров ФЗ попадают высота, плотность застройки, коэффициент застроенности, коэффициент озеленённости и даже требования к архитектурному облику. Таким образом, в нормативной базе можно отследить тенденцию к детализации ограничений на застройку на самом верхнем уровне – на уровне Генерального плана города. Однако ранее в нашей стране не проводились исследования, к чему может привести такая детализация и имеет ли она практический смысл.

Целью исследования является выработка подхода к функциональному зонированию территории, при котором Генеральный план города имел бы максимальную степень реализации.

Задачами исследования являются:

1. определение того, насколько параметры ФЗ Генерального плана соответствуют существующим показателям спустя 10–20 лет после утверждения документа территориального планирования;

2. определение степени влияния строгого или менее строгого регулирования функциональных зон на развитие города.

Объектом исследования являются утверждённые Генеральные планы городов России.

Перед проведением данного исследования был проанализирован мировой опыт в части установления различных параметров на ФЗ и ТЗ.

В других странах мира (анализ проводился в США, Германии, Франции, Китае, Бразилии, Индии) [1-5] наиболее распространённым параметром в градостроительном планировании и регулировании землепользования является плотность застройки (FAR), а также этажность. FAR ограничивается в городах по всему миру с целью уменьшения количества рабочих мест и плотности населения в центре города (что приводит к

потере качества окружающей среды и увеличению пробок на дорогах). Но у жёстких ограничений есть своя обратная сторона.

Основные выводы проводимых ранее полномасштабных исследований таковы: уменьшение плотности и высоты в центре города ведёт к разрастанию территории в границах городской черты в Бразилии (в анализе участвовали 325 городов) [2], несоблюдению требований нормативов и увеличению коррупционной составляющей в Китае (в анализе рассмотрены 30 городов Китая) [3]. Например, Мун и Ан (2022) показывают, что более низкий максимально разрешенный FAR (включает соотношение коммерческих и некоммерческих площадей) связан с более высокими шансами на досрочный снос, уменьшение стоимости земли в Нью-Йорке [5]. Алан Бертод и Жан Брюкнер доказывают, что более жёсткий FAR связан с разрастанием города и уменьшением благосостояния в Индии [1].

Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что увеличение ограничений во всём мире приводит либо к их несоблюдению, либо к разрастанию города, либо к изменению цен на землю и арендную плату на недвижимость [4].

В представленном исследовании будут рассмотрены результаты различных политик в этом направлении в России и сделаны выводы о том, какие именно параметры функциональных зон соблюдаются на практике более или менее строго.

В большинстве городов детальные параметры на ФЗ ранее не устанавливались, однако были и исключительные примеры с подробной проработкой и поквартальным зонированием, которые будут рассмотрены ниже.

Особенностью данного исследования является подробный анализ каждого города и его Генерального плана в отдельности, так как единого шаблона или строгих методических рекомендаций (кроме требований ГК РФ) по составлению Генеральных планов в России не существует. Следовательно, состав документа в полной мере зависит от методической базы разработчиков. В одном Генеральном плане могут выделяться примагистральные территории как особые зоны, в то время как в другом Генеральном плане разработчики создают планировочные районы, исходя из структурной значимости элемента городской структуры. Таким образом, анализ не может быть шаблонным. Если в одном городе мы исследуем реализацию плотностных характеристик застройки, то в другом городе это может быть процент коммерческой составляющей в жилых зонах. Однако, в большом количестве рассматрива-

емых городов всё же были выделены повторяющиеся параметры, имеющие закономерности в реализации.

Методика исследования. На первом этапе анализируются Генеральные планы 17 крупных городов РФ (список городов представлен в Основной части). Из них выбираются те, по которым Генеральные планы наиболее подробны, а параметры функциональных зон потенциально проверяемы с точки зрения их реализации. Для иллюстрации аналитики в статье представлены три города с подробными Генеральными планами.

Для этого анализа были использованы публичные данные Генеральных планов, расположенные на сайтах администраций городов [13]. Параметры ФЗ, а также границы зон планируемой реорганизации территории указаны в Положениях о территориальном планировании [13].

На втором этапе в выбранных городах более подробно рассматриваются зоны, предложенные для реорганизации в Генеральном плане. По типологии выборка зон может не совпадать между собой, так как в одном Генеральном плане была запланирована интенсификация коммерческих функций на примагистральных территориях, а в другом Генеральном плане такой задачи не стояло.

На третьем этапе для выбранных зон производится сопоставление параметров Генерального плана и существующего положения по застройке на 2024 год. Для этого используются:

1. данные Open Street Map (OSM) [15], которые дают представление о текущем положении. Они включают в себя этажность зданий, озеленённость территорий, коэффициент застроенности участков, положение «объектов интереса» (объектов социального и коммерческого обслуживания, офисов);
2. открытые данные ГИС ЖКХ (<https://dom.gosuslugi.ru>): этажность зданий, соотношений коммерческих и некоммерческих помещений в рамках одного здания [14];
3. данные ИСОГД по всем городам;
4. открытые данные фонда развития территории (Фонд развития территорий (`xn--plae-xn--plai`)). Аналитика проводилась на Геоинформационной платформе QGIS.

После анализа пяти и более крупных городов делаются выводы о степени реализуемости разных параметров функциональных зон и целесообразности их установления в Генеральном плане.

Основная часть. Градостроительный кодекс РФ (2004–2024 гг.) не указывает, какие именно параметры должны быть в составе функциональных зон.

В российской практике фигурируют параметры, влияющие на формирование загрузки инженерной и транспортной инфраструктур, благоприятность городской среды, инвестиционную привлекательность территорий, экологическую безопасность проживания населения, а иногда даже эстетическую привлекательность и облик районов города.

Анализ результатов установления тех или иных параметров (плотности, высотности) в Генеральных планах и Правилах землепользования и застройки изучали многие российские исследователи: Левина Ю.С. [5], Макарова К.П. [6], Зарубин О.А., Климов А.Е., Гудзь Т. [7], Карасельникова И., Косолапов Н., Чебакова А.А., Карелин Д.В. [8], Ривкин А.Б., Конторович И.Я. [9], Моисеев Ю.М. [10], Черепанов К.А. [11], Митягин С.Д. [12].

А.Б. Ривкин и И.Я. Конторович изучали историю возникновения понятия «плотность застройки» в России и влияние данного показателя на скорость движения транспорта (при увеличении плотности, соответственно, уменьшается

скорость) и этажность. С.Д. Митягин верно подметил, что невозможно точно предугадать плотностные, высотные и объемно-пространственные характеристики застройки без разработки детального проекта и наличия инвестора. Н. Косолапов и Т. Гудзь раскрывают в своих исследованиях неустойчивость института ПЗЗ, а также непоследовательность принятия решений в сфере регулирования, что приводит к нарушению параметров ФЗ и ТЗ.

Среди публичной градостроительной документации крупных и крупнейших городов РФ в данном исследовании были проанализированы 17 Генеральных планов городов [13], более детально следующие: Нижний Новгород, Пермь, Тюмень, Москва, Челябинск, Воронеж, Ростов-на-Дону, Волгоград. Приоритетными в выборе для аналитики были Генеральные планы, срок реализации которых подошёл к концу в 2024 году (т.к. здесь можно отследить реализацию), а также те, в которых устанавливались наиболее детальные параметры для функциональных зон (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров функциональных зон в Генеральных планах в крупных и крупнейших городах РФ

№	Город	Установленные параметры функциональных зон
1	Москва	Фонд застройки (максимальная суммарная поэтажная площадь застройки на территории зоны)
2	Санкт-Петербург	Площадь зоны
3	Казань (до 2020 г.)	Параметры устанавливаются на дальнейших стадиях проектирования, а также в ПЗЗ и местных нормативах
4	Красноярск (Основной чертёж от 21.11.2016 г.)	Площадь зоны
5	Екатеринбург (до 2025 г.)	Параметры каждой зоны в явном виде в утверждаемой части проекта не установлены
6	Новосибирск (до 2030 г.)	Параметры каждой зоны в явном виде в утверждаемой части проекта не установлены
7	Самара (до 2020 г.)	Параметры установлены на площадки развития на неосвоенных территориях: плотность населения, чел/га
8	Волгоград (до 2025 г.)	Фонд застройки по районам города. По каждой зоне параметры не установлены
9	Пермь (до 2022 г.)	Функциональные зоны делятся на «стандартные территории нормирования» и «территории ситуативного проектирования». Для каждого типа установлены: – площадь брутто; – доля площади нетто*; – доля площади улиц в красных линиях от площади СТН и ТСП брутто; – доля озеленённых территорий общего пользования по отношению к СТН брутто**; – доля участков детских садов и школ по отношению к СТН брутто; – максимальная плотность застройки всех видов; – максимальная плотность жилой застройки; – максимальный процент застройки территорий нетто для функциональных зон***; – показатели плотности УДС; – предельная площадь кварталов

10	Омск (до 2030 г.)	– Площадь зоны; – максимальная плотность населения, чел/га; – максимальная этажность
11	Челябинск (до 2021 г.)	– Плотность населения, чел/га; – прирост фонда застройки на жилых зонах
12	Ростов-на-Дону (актуальная редакция 2023, актуализация материалов 2007)	Для застроенных территорий: – этажность; – плотность застройки; – коэффициент застройки (застроенность). Для озелененных территорий: – рекреационная нагрузка при равномерном ежедневном восьмичасовом перемещении на 1 посетителя 7–200 м ² .
13	Краснодар (от 2012 г.)	Параметры каждой зоны в явном виде в утверждаемой части проекта не установлены
14	Воронеж (от 2020 г.)	– Процент различных функций на территории каждой зоны. Например, на территории «Курортной зоны» должно быть не более 25 % объектов жилого назначения, не более 50 % объектов общественного назначения, не более 15 % объектов производственного назначения; – процент озеленённых территорий в каждой зоне
15	Уфа (от 2023 г.)	– Процент различных функций на территории каждой зоны; – площадь зоны
16	Нижний Новгород (от 17.03.2010)	Для общественных территорий: – застроенность, озеленённость, плотность. Для жилых территорий: – застроенность, озеленённость, плотность, доля коммерческих объектов. Для всех примагистральных территорий устанавливается повышенная плотность и повышенная доля общественных объектов. Для производственных территорий: – плотность рабочих мест, регулярная планировочная решетка кварталов с рекомендуемым модулем не более 4 га. Для всех типов производственных зон и кварталов размещение промышленных и других объектов должно осуществляться не ближе 15 м от «красной линии», если иное не установлено линиями регулирования в градостроительной документации. В природно-рекреационных зонах регулируются: – показатели рекреационной нагрузки; – соотношение территорий, занятых зелеными насаждениями, дорожно-тропиночной сетью, сооружениями и застройкой; – габариты допускаемой застройки и её назначение; – основные виды разрешенного использования территории
17	Тюмень (от 2012 г.)	Площадь зоны; максимальная высота; максимальная плотность застройки м ² /га

Примечания: *площадь нетто функциональных зон — площадь без учёта улиц и озелененных территорий общего пользования. Для расчета площади нетто функциональных зон жилого назначения дополнительно вычитаются площади земельных участков детских садов и общеобразовательных школ с учетом их развития на перспективу;
**озелененные территории общего пользования включают в себя: парки культуры и отдыха, сады, скверы, бульвары, плоскостные спортивные сооружения, специализированные парки, мини-парки и иные подобные объекты для отдыха населения;
***процент застройки — доля территорий, занятых объектами капитального строительства в габаритах внешнего периметра наружных стен от общей площади территории.

По результатам анализа выявлено, что лишь некоторые города РФ утверждали в своих Генеральных планах параметры функциональных зон, схожие с Регламентами Правил землепользования и застройки. Среди них можно назвать

Пермь, Нижний Новгород, Ростов-на-Дону, Тюмень, Воронеж. К 2024 году эти целевые показатели уже должны были быть достигнуты.

В качестве основных целей и задач подготовки Генеральных планов в вышеперечислен-

ных городах были озвучены следующие (цитирование из Генерального плана Нижнего Новгорода):

Повышение интенсивности градостроительного использования существующих застроенных территорий для обеспечения компактной структуры города, сокращения транспортных издержек и активного развития массового пассажирского транспорта.

Исключение стихийного, экстенсивного территориального роста города, особенно без надлежащего обеспечения новых районов социальной, инженерной и транспортной инфраструктурами» (однако, как мы уже обнаружили в мировых исследованиях, ограничение плотности в центре, наоборот, приводит к разрастанию периферии).

По вышеперечисленным городам проводилась аналитика, позволяющая ответить на текущие вопросы:

– удалось ли повысить плотность на примыкающих территориях на застроенных территориях срединного пояса города (не центральная часть и ещё не периферия) и внедрить коммерческие функции в жилые зоны (чтобы уменьшить маятниковую миграцию в центр и обеспечить компактность структуры города);

– соответствуют ли заложенные в Генеральном плане параметры ФЗ реализованным показателям на незастроенных ранее территориях;

– как реализовались установленные плотность, высотность, застроенность, озеленённость, процент коммерческих функций на территории жилых зон на момент 2024 г. в целом.

Далее для примера будут приведены три города.

Нижний Новгород. Генеральный план Нижнего Новгорода имеет отличительную особенность, которая состоит в том, что в состав утверждаемой части проекта входит детальное зонирование с установлением параметров ФЗ, а функциональные зоны очень близки к ТЗ Правил землепользования и застройки. В некоторых местах параметры ФЗ даже выглядят как регламенты ПЗЗ. Следовательно, назначаются высотность, плотность и озеленённость практически на все ФЗ.

Исходя из Карты ФЗ были выделены территории анализа: срединная зона города со смешанной жилой застройкой и территории нового строительства.

Результаты аналитики реализации представлены ниже (рис. 1).

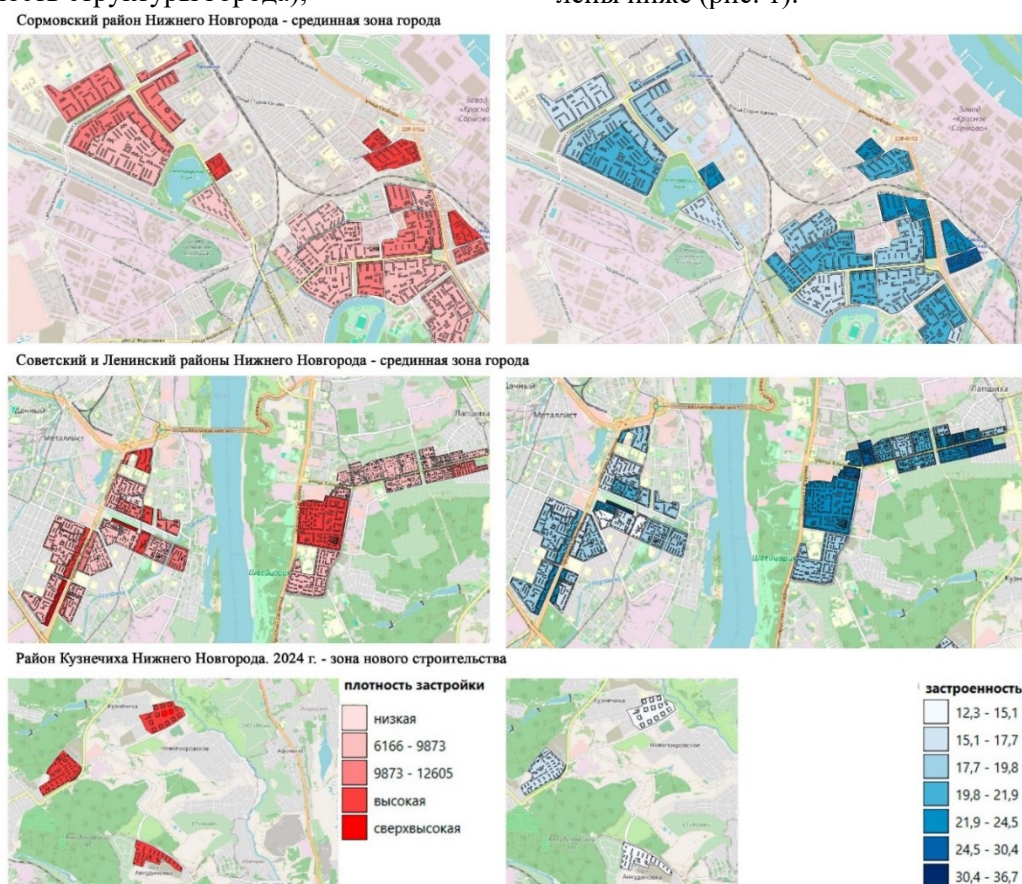


Рис. 1. Схема плотности застройки ($\text{м}^2/\text{га}$) и процент застроенности на территориях, предложенных к реорганизации и интенсификации использования в 2012 году Генпланом

В Генеральном плане для рассматриваемых смешанных жилых зон были установлены следу-

ющие параметры: процент застроенности (не более 50 %), процент озеленённости (не менее 30 %)

площади квартала), процент коммерческих функций в жилых зонах (не более 30 % коммерческих помещений среди суммарного фонда застройки), повышенная плотность застройки примагистральных территорий и повышенный процент коммерческих функций.

Согласно аналитическим картам, плотности застройки не всегда повышены на примагистральных территориях, а лишь в районах абсо-

лютно нового строительства, что не соответствует стратегии Функционального зонирования. Процент застроенности полностью соответствует заданным параметрам. Карта озеленённости (рис. 2) иллюстрирует, что на территориях нового строительства (Кузнечиха) озеленённость ниже 30 %, заложенных Генеральным планом. Озеленённость «ушла» в пользу парковочного пространства (исходя из материалов утвержденных проектов планировки).

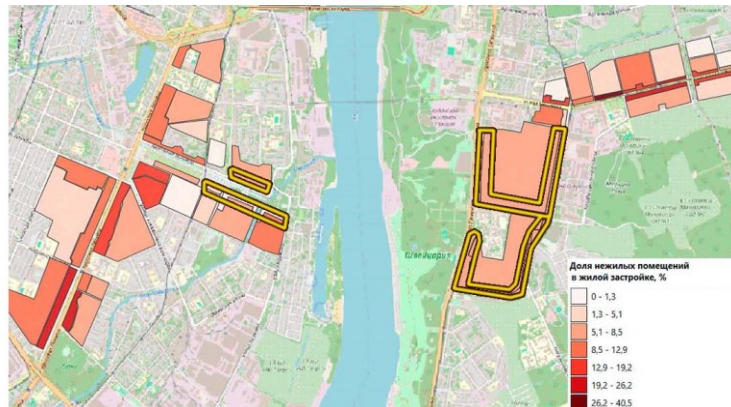


Рис. 2. Схема озеленённости и схема соотношения жилых и нежилых функций в примагистральных территориях жилой застройки

Пермь. История Генерального плана Перми особенна тем, что в материалах по обоснованию проектных решений существенный вклад в концепцию внёс «Мастер-план», разработанный в 2010 году. «Мастер-план» содержал требования к новой застройке по форме и конфигурации, а также концепцию распределения высотности. Однако в 2012 году в свет вышел проект регулирования высотности застройки [7]. Он противоречил идеям «Мастер-плана» и Генерального плана, ограничивая высоту в центре и увеличивая показатели высоты в срединном поясе.

Генеральный план Перми отличается особым подходом к классификации функциональных зон. Они делятся на Стандартные территории нормирования (СТН) и территории ситуативного проектирования (ТСП). Среди СТН есть деление на центральную и нецентральную части города, а также на жилую (монозонирование) и многофункциональную застройку.

Среди всех СТН есть «СТН комплексного преобразования» – функциональные зоны в виде СТН-А, всех СТН-Б, а также СТН-В1, В2, В3, СТН-Г1, Г2, Г8, «в отношении которых запланировано осуществить проекты преобразований для создания комплексной застройки жилого и иного назначения» (из Генерального плана Перми).

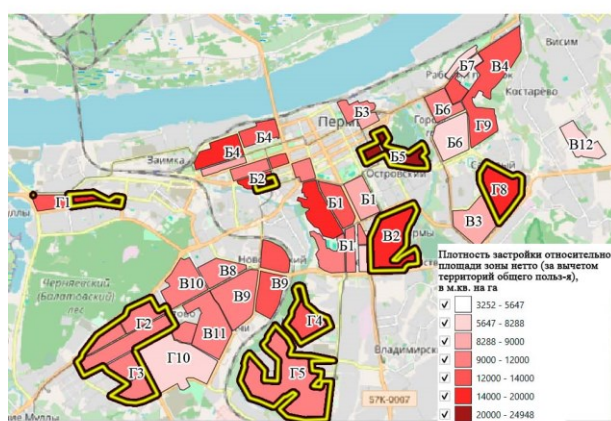
Именно СТН комплексного преобразования и были выбраны для аналитики. С помощью математических алгоритмов были вычислены данные существующего положения 2024 года: доля

площади озеленённых территорий общего пользования (парков, скверов, бульваров, городских лесов в границах СТН), доля площади земельных участков общеобразовательных школ и детских садов, доля площади кварталов, предназначенных под застройку, плотность застройки, высотность кварталов.

Для подсчёта доли коммерческих помещений среди всего фонда застройки были использованы данные Фонда развития территории (открытые данные управляющих компаний), которые включают в себя данные по каждому дому: количество жилых помещений, количество нежилых помещений, площадь помещений в составе общего имущества, общая площадь здания и т.д.

Графические результаты аналитики представлены ниже (рис. 3).

В статье Гудзь Т.В., Карасельниковой И.В., Косолапова Н.А. [7] довольно подробно оценивается влияние ограничения высоты центральной части: девелоперская активность на периферии усиливается, и вместо того, чтобы ПЗЗ и Генеральный план регулировали застройку, девелоперы начинают давить на органы местного самоуправления и корректировать ПЗЗ и Генеральный план. По результатам графической аналитики очевидно, что параметры плотности и процент нежилкой застройки относительно всего фонда в зонах аналитики не соблюдаются. Озеленённость и процент застроенности соответствуют утверждённым показателям.



Наименования функциональных зон с утверждёнными параметрами по Ген. плану:

Б- зона городского центра

максимальная плотность нетто застройки всех видов объектов капитального строительства:

- не более 20000 кв.м/га
- доля озелененных территорий общего пользования:
- не менее 7%
- максимальный процент застройки территорий нетто для функциональных зон:
- 55%

В - зона многофункциональной застройки срединной части города

максимальная плотность нетто застройки всех видов строительства - не более 14000 кв.м/га;

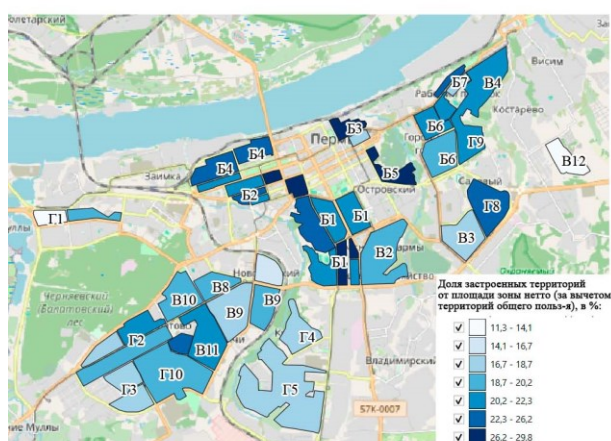
- доля озелененных территорий общего пользования:
- не менее 7%
- максимальный процент застройки территорий нетто для функциональных зон:
- 50%

максимальная доля помещений нежилого назначения от общей площади помещений всех видов использования (с учетом наземной части объектов капитального строительства для размещения автомобильных стоянок) - 15%;

Г - зона многофункциональной жилой застройки

видов объектов капитального строительства

- не более 9000 кв.м/га
- доля озелененных территорий общего пользования :
- не менее 6%
- максимальный процент застройки территорий нетто для функциональных зон:
- 45%
- максимальная доля помещений нежилого назначения от общей площади помещений всех видов использования (с учетом наземной части объектов капитального строительства для размещения автомобильных стоянок) - 15%;



Зоны нарушения параметров Генерального плана

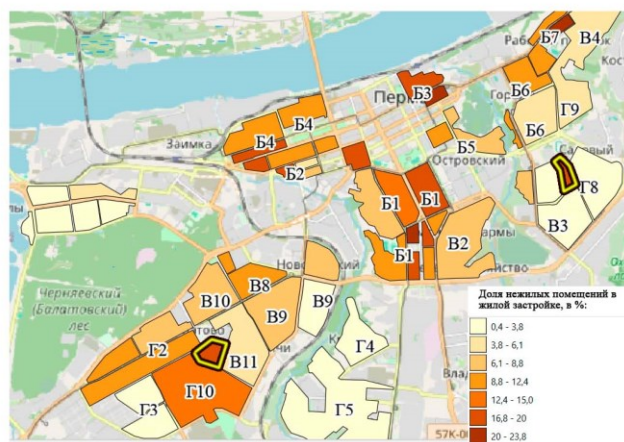
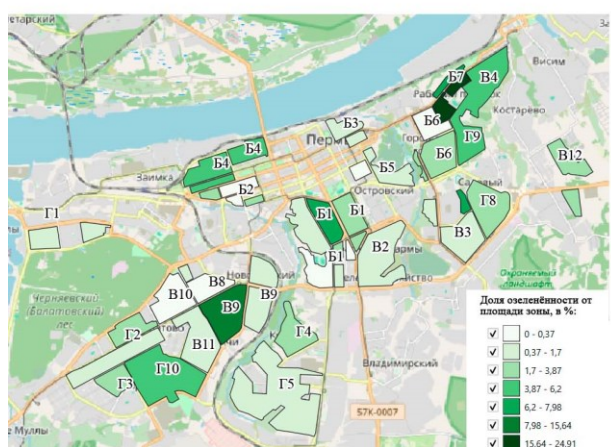


Рис. 3. Аналитика нарушений параметров функциональных зон в г. Перми

Тюмень. В Положении о территориальном планировании Тюмени для каждого района города установлена максимальная этажность и максимально допустимая плотность застройки отдельно по каждому району города. Например, на территории 10-го планировочного района «Тюменский» максимальная этажность равна 20 эт., а плотность застройки – не более 4200 м² на га (рис. 4), на территории 5-го планировочного района «Заречный» – этажность не более 20 эт., а плотность застройки – не более 2900 м² на га, на территории 9-го планировочного района «Южный» максимальная этажность равна 16 эт., а

плотность застройки – не более 3400 м² на га. Весь город покрыт крупными проектами планировки на каждый планировочный район. Это соотносится с политикой Москвы в части присоединённых территорий: задавать только критически важные параметры (один или два), а потом уточнять на следующей стадии проектирования.

Для анализа выбраны зоны многоквартирной жилой застройки срединной части города (районы Южный, Заречный и Тюменский), что аналогично другим городам, так как здесь наиболее наглядно визуализируются зоны нарушения параметров Генерального плана.

В данном Генеральном плане озеленённость и процент коммерческих функций не устанавливались.

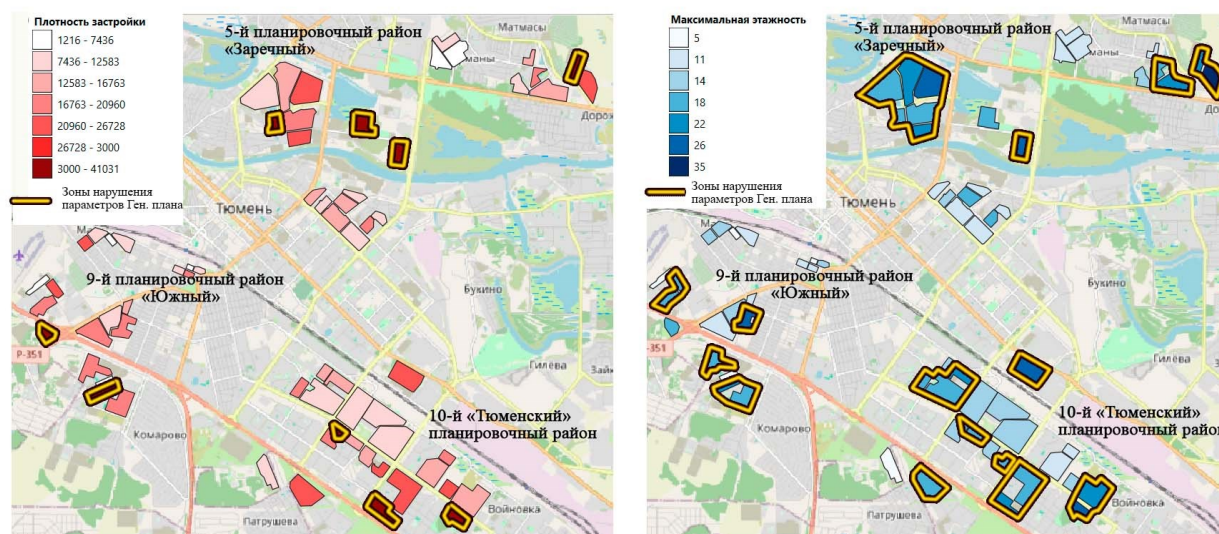


Рис. 4. Аналитика нарушения параметров плотности застройки и максимальной этажности на функциональных зонах на территориях планировочных районов «Тюменский», «Заречный», «Южный»

В результате анализа нарушения выявлены на значительной части территорий, при этом нарушения по этажности обнаруживаются чаще, чем нарушения по плотности.

Выводы. В данном исследовании, кроме Перми, Нижнего Новгорода и Тюмени, также были подробно рассмотрены Ростов-на-Дону, Москва, Воронеж, Волгоград, Челябинск.

В результате исследования восьми городов РФ были сделаны выводы о том, что подробные параметры функциональных зон (плотность, озеленённость, высотность, доля коммерческих функций или соотношение функций внутри зоны), как правило, не соблюдаются. Величина отклонений по параметру плотности, например, составляет около 20 %. Внедрение доли коммерческих функций средствами Генерального плана в жилую застройку также осталось нереализованным. Путём внесения изменений в Генеральный план и Правила землепользования и застройки девелоперы с помощью органов местного самоуправления добиваются повышения показателей застройки. Доля озеленённости на новых участках застройки не соблюдается, так как озеленение уменьшается в балансе территорий в пользу парковочного пространства (на примере новых районов Нижнего Новгорода). Не подвержены сокращению только участки озеленения, имеющие особый статус («природный комплекс» в Москве), так как они строго учтены и задокументированы. При этом уменьшение количества устанавливаемых параметров приводит к более устойчивому их соблюдению (на примере Москвы и присоединённых территорий (URL:

Градостроительный кодекс Москвы. Реализация Генерального плана города Москвы - Электронная Москва (mosopen.ru)). В Москве, Волгограде и Челябинске установлен параметр максимального фонда, который имеет отклонения в реализации не более 10 %.

Максимальный фонд застройки (как параметр ФЗ) ограничивает лишь критические нарушения, влияющие на качество жизни всех жителей города (экологический коллапс, транспортный коллапс). Назначение такого параметра реалистично только при условии наличия корректной транспортно-инфраструктурной модели и поддерживающего её штата сотрудников, что выполнимо лишь в таких мегаполисах как Москва.

Эта модель наглядно демонстрирует результаты превышения установленного параметра: невозможность строительства инженерной инфраструктуры, транспортные проблемы, нарушение экологического комфорта жителей.

При отсутствии возможности создания и обслуживания транспортно-инженерно-экономической модели города (как в большинстве городов РФ), управление параметрами происходит в «ручном режиме», при котором ответственность и право выбора предельных параметров полностью лежат на плечах местной администрации. При этом иллюстрация долгосрочных последствий неправильных решений отсутствует.

Оптимальным в таком случае становится внедрение в каждую информационную систему градостроительной деятельности крупных городов единых публичных параметров по функциональным зонам, которые бы были доступны для

проверки каждому жителю города (как в США), таким образом повышая вероятность их соблюдения. Согласно результатам исследования, таких параметров должно быть не более двух. Дальнейшая детализация происходит на документах следующего уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bertaud A. Analyzing Building Height Restrictions: Predicted Impacts, Welfare Costs, and a Case Study of Bangalore, India // World Bank Policy Research Working Paper. Vol. 3290. 2004. Pp. 1–40.
2. Brueckner J. Measuring the Stringency of Land-Use Regulation and Its Determinants: The Case of China's Building-Height Limits // SSRN Electronic Journal. January. 2015. Pp. 2–10.
3. Cai H. To build above the limit? Implementation of land use regulations in urban China // Journal of Urban Economics. 2017. Vol. 98. Pp. 223–233.
4. Carvalho, R. FAR Regulations and the Spatial Size of Brazilian Cities // SSRN Electronic Journal. December 2022. Pp. 2–10.
5. Moon B. The effects of a FAR regulation in a model of durable building with redevelopment: The case of New York City // Regional Science and Urban Economics. March 2022. 95 p.
6. Макарова К. Математико-картографическое моделирование плотности застройки городской среды // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. № 3. С. 321–325.
7. Гудзь Т.В., Карасельникова И.В., Косолапов Н.А. Правовое зонирование. Регулирование городской застройки. Опыт Перми. М.: Издательский дом Высшей школы экономики. 2020. С. 3–95.
8. Чебакова А. Влияние параметров плотности застройки на комплексное развитие городских территорий // Труды новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2021. Т. 24. № 1/2(79/80). С. 69–75.
9. Ривкин А. Рациональное использование территории городов. М.: Стройиздат, 1986. 171 с.
10. Моисеев Ю.М. Планировочные условия плотности в компоновке городских пространств: диссертация ... кандидата архитектуры : 18.00.04. Москва, 1981. С.15–152.
11. Черепанов К.А. Проблемы выбора оптимальных параметров застройки в зависимости от социальных, экономических и экологических свойств городской среды // Молодой ученый. 2014. №2 (61). С. 216–232.
12. Митягин С.Д. Ограничить, нельзя разрешить // Зодчий. 21 век. 2008. № 4. С.24–27.
13. Сайты администраций для аналитики всех крупных городов (Генеральные планы городов) [Электронный ресурс]. URL: <https://admgor.nnov.ru/>, <https://www.gorodperm.ru/>, <https://www.tyumen-city.ru/>, <https://genplan-mos.ru/>, <https://kgainfo.spb.ru/>, <https://kzn.ru/>, <http://www.admkrsk.ru/>, <https://xn--80ac-gfbsl1azdqr.xn--p1ai/>, <https://novo-sibirsk.ru/>, <https://www.samadm.ru/>, <https://volgadmin.ru/>, <https://admomsk.ru/>, <https://smichelduma.ru/>, <https://rostov-gorod.ru/>, <https://uga.voronezh-city.ru/>, <https://genplan.krd.ru/>, <https://genplan.krd.ru/>. (дата обращения 15.01.2024).
14. Геоинформационная система ГИС ЖКХ [Электронный ресурс]. URL: dom.gosuslugi.ru (дата обращения: 01.02.2024).
15. Геоинформационная система OpenStreetMap [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 01.03.2024).

Информация об авторах

Хмелёва Екатерина Владимировна, старший преподаватель кафедры градостроительства, аспирант. E-mail: queen13@mail.ru, x-tam@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Сафаргалеев Андрей Владимирович, аспирант кафедры бизнес-информатики. E-mail: Andrey.safar@gmail.com. Северо-Западный институт управления – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации». Россия, 199178, Санкт-Петербург, Средний просп. В.О., дом № 57/43.

Поступила 25.03.2024 г.

© Хмелёва Е.В., Сафаргалеев А.В., 2024

^{1,*}*Khmeleva E.V.*, ²*Safargaleev A.V.*¹*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*²*North-West Institute of Management – Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation»***E-mail: x-tam@mail.ru*

ESTABLISHMENT AND IMPLEMENTATION OF DETAILED PARAMETERS OF FUNCTIONAL ZONES IN MASTER PLANS OF LARGE CITIES ON THE EXAMPLE OF NIZHNY NOVGOROD, PERM AND TYUMEN

Abstract. The article examines the implementation of city master plans in terms of the parameters of the planned development of functional zones in order to identify the most feasible indicators. An analysis of 17 cities was carried out and the main parameters used in Russian practice were identified. Large cities that have in their General Plans a set of parameters close to the regulations of the Land Use and Development Rules, and whose implementation period has come to an end in 2024, are examined in more detail: Nizhny Novgorod, Perm, Tyumen. The implementation of the assigned parameters of density, height, built-up area, greenery, percentage of commercial functions inside residential buildings using geographic information systems is analyzed. This is especially important in connection with the emergence of a new document in urban planning practice, combining the General Plan and Land Use and Development Rules. International experience in the field of urban regulation is considered, including in China, Brazil, India, and the United States of America, and analogies are drawn with Russian practice. The study collected and used a lot of data from various open sources, such as the Housing and Communal Services Fund, Wikimapia, approved parts and materials on the justification of city master plans, Open Street Map. Geoanalytics was carried out in the Python programming language.

Keywords: implementation of the Master Plan, functional zoning, building density, greenery, built-up area.

REFERENCES

1. Bertaud A. Analyzing Building Height Restrictions: Predicted Impacts, Welfare Costs, and a Case Study of Bangalore, India. World Bank Policy Research Working Paper. 2004. Vol. 3290. Pp. 1–40.
2. Brueckner J. Measuring the Stringency of Land–Use Regulation and Its Determinants: The Case of China’s Building–Height Limits. SSRN Electronic Journal. January 2015. Pp. 2–10
3. Cai H. To build above the limit? Implementation of land use regulations in urban China. Journal of Urban Economics. 2017. Vol. 98. Pp. 223–233.
4. Carvalho R. FAR Regulations and the Spatial Size of Brazilian Cities. SSRN Electronic Journal. December 2022. Pp. 2–10.
5. Moon B. The effects of a FAR regulation in a model of durable building with redevelopment: The case of New York City. Regional Science and Urban Economics. March 2022. 95 p.
6. Makarova K. Mathematical and cartographic modeling of urban development density [Matematiko–kartograficheskoe modelirovanie plotnosti zastroiki gorodskoi sredy] Nauchno–tekhnicheskii vestnik Brianskogo gosudarstvennogo universiteta. 2018. No. 3. Pp. 321–325. (rus)
7. Gud' T. Regulation of urban development. Legal zoning. Regulation of urban development. Perm experience. [Regulirovanie gorodskoi zastroiki. Opit Permi]. Vysshaya shkola urbanistiki. 2020. Pp. 3–95. (rus)
8. Chebakova A. The influence of building density parameters on the integrated development of urban areas [Vliyanie parametrov plotnosti zastroiki na kompleksnoe razvitiye gorodskikh territorii]. Trudy novosibirskogo gosudarstvennogo arkhitekturno–stroitel'nogo universiteta (Sibstrin). 2021. Vol. 24. No. 1/2 (79/80). Pp. 69–75. (rus)
9. Rivkin A. Rational use of urban areas [Ratsional'noe ispol'zovanie territorii gorodov]. Moskva: Stroiizdat, 1986. 171 p. (rus)
10. Moiseev M. Planning conditions for density in the layout of urban spaces [Planirovochnye usloviya plotnosti v komponovke gorodskikh prostanstv]. Dissertatsiya ... kandidata arkhitektury. 18.00.04. Moskva, 1981. Pp. 15–152. (rus)
11. Cherepanov K.A. Problems of choosing optimal development parameters depending on the social, economic and environmental properties of the urban environment [Problemy vybora optimal'nykh parametrov zastroiki v zavisimosti ot sotsial'nykh, ekonomicheskikh i ekologicheskikh svoystv gorodskoi sredy]. Molodoi uchenyi. 2014. No. 2 (61). Pp. 216–232. (rus)
12. Mityagin S.D. Restrict, cannot be allowed [Ogranichit', nel'zya razreshit']. Zodchij. 21 vek. No. 4. 2008. Pp. 24–27. (rus)

13. Saity administratsii dlia analitiki vseh krupnykh gorodov (General'nye plany gorodov) URL: <https://admgor.nnov.ru/>, <https://www.gorodperm.ru/>, <https://www.tyumen-city.ru/>, <https://genplanmos.ru/>, <https://kgainfo.spb.ru/>, <https://kzn.ru/>, <http://www.admkrsk.ru/>, <https://xn--80acgfbsl1azdqr.xn--p1ai/>, <https://novo-sibirsk.ru/>, <https://www.samadm.ru/>, <https://volgadmin.ru/>, <https://admomsk.ru/>, <https://smichelduma.ru/>,

<https://rostov-gorod.ru/>, <https://uga.voronezh-city.ru/>, <https://genplan.krd.ru/>, <https://genplan.krd.ru/>. [Accessed 15.01.2024]. (rus)

14. Geoinformatsionnaia sistema GIS ZHKKH – URL: dom.gosuslugi.ru. (Accessed 01.02.2024). (rus)

15. Geoinformatsionnaia sistema Open-StreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (Accessed 01.03.2024). (rus)

Information about the authors

Khmeleva, Ekaterina V. Postgraduate student (PhD candidate), senior lecturer. E-mail: queen13@mail.ru, x-tam@mail.ru. Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-nd Krasnoarmeiskaya Str., 4.

Safargaleev, Andrei V. Postgraduate student (PhD candidate), senior lecturer. E-mail: Andrey.safar@gmail.com. North-West Institute of Management - Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation». Russia, 199178, Saint Petersburg, Sredniy prospect V.O., 57/43.

Received 25.03.2024

Для цитирования:

Хмелёва Е.В., Сафаргалеев А.В. Установление и реализация подробных параметров функциональных зон в генеральных планах крупных городов на примере Нижнего Новгорода, Перми и Тюмени // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 65–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-65-75

For citation:

Khmeleva E.V., Safargaleev A.V. Establishment and implementation of detailed parameters of functional zones in master plans of large cities on the example of Nizhny Novgorod, Perm and Tyumen. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 65–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-65-75

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-76-87

Какунец К.В.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: Kkakunets@mail.ru

ОБЩЕСТВЕННО-АДМИНИСТРАТИВНЫЙ ЦЕНТР ВОЛОДАРСКОГО (НЕВСКОГО) РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА. ПРОЕКТЫ И ФАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ. ОСОБЕННОСТИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО И ОБЪЁМНО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО РЕШЕНИЯ

Аннотация. Градостроительная особенность застройки общественно-административного районного центра Володарского (Невского) района заключается в ансамблевом построении его композиции. Несмотря на многочисленные изменения в проектных решениях и длительную по времени реализацию проекта, градостроительный потенциал, заложенный при проектировании данного центра, прослеживается в его современной структуре, а также в структуре всего Невского района и города в целом. Данная градостроительная композиция актуальна для изучения и формирования предложений по сохранению общественного центра, в качестве единой градостроительной композиции. Наличие проектных материалов разных лет, в том числе Генеральных планов Ленинграда и проектных предложений по застройке территории района Щемиловки 1930-1960 годов, а также натурные исследования позволяют проанализировать задуманные и реализованные градостроительные и объёмно-пространственные особенности данного комплекса и выявить особенности формирования общественно-административного центра Володарского (Невского) района в городе Санкт-Петербурге. Целью данного исследования является выявление ключевых градостроительных и объёмно-пространственных особенностей, повлиявших на застройку общественно-административного центра Володарского (Невского) района. Данное исследование может являться основой для дальнейшей работы над совершенствованием предметов охраны для общественно-административного районного центра Володарского (Невского) района.

Ключевые слова: Общественно-административный центр, Володарский район, Невский район, градостроительная композиция, райсовет.

Введение. Архитектурное наследие Ленинграда первой половины XX века включает в себя инновационный для того времени подход к организации общественных центров, связанный новыми градостроительными возможностями в рамках общей концепции развития всего города и в связи со стремительным увеличением городских территорий.

Изучению градостроительства и архитектуры Ленинграда посвящены работы таких авторов, как: Баранов Н.В. [1], Витман А.А. [2], Вайтенс А.Г. [3], Каменский В.А. [4], Кириков Б.М. [5], Лисовский В.Г. [6], Семенцов С.В. [7], и многих других. Основы советской архитектуры сталинского периода также рассмотрены в работе Костовой Е.В. [8]. Ильвицкая С.В. и Комиссаров А.В. в своей работе изучили вопрос, связанный с динамической архитектурной общественных центров. [9]

Тема градостроительства и архитектуры общественных центров не раз была упомянута в публикациях в составе общих исследований. Значимость данных объектов для градостроительства и архитектуры Ленинграда заслуживает отдельного их изучения.

С первых лет установления советской власти, архитекторы вели работу над совершенство-

ванием существующих и созданием новых общественных центров, ансамблей в Ленинграде. План урегулирования Петрограда (Фомин И.А., Рославлев М.И., Кривенко В.С. и др., 1923 года) уже включал в себя, кроме всего прочего, планы совершенствования отдельных ансамблей, территорий и фрагментов города [10]. На Эскиз-схеме планировки Ленинграда. (Ильин Л.А. 1932 г.) [11], прослеживаются первые идеи создания системы общественных центров, как узловых элементов планировочной структуры города. В этой системе намечена иерархия центров по градостроительной значимости: от крупных центров городского значения (исторический центр Санкт-Петербурга, новый центр на пересечении Международного (Московского) проспекта и главной дуговой магистрали), до районных центров, которые, в свою очередь, поддерживаются менее значимыми в градостроительном смысле центрами микрорайонов, перекрёстками и скверами. Данное направление градостроительного развития общественных центров было поддержано и развито и в более поздних проектах Генеральных планов Ленинграда.

Объектом данного исследования является общественно-административный центр Володарского (Невского) района. Он является одним из

главных районных центров в новых районах Ленинграда, который был реализован, хотя и не в полной мере, относительно первоначальных проектов. Степень его реализации, а также заложенные идеи необходимо изучить для понимания градостроительной значимости и замысла всего комплекса в городской структуре. Целью работы является выявление ключевых градостроительных и объемно-пространственных особенностей, повлиявших на застройку общественно-административного центра Володарского (Невского) района.

Задачи, поставленные в ходе работы, включают в себя изучение Генеральных планов Ленинграда и проектных предложений по застройке района Щемиловка разных лет, а также обобщённое описание ключевых особенностей для каждого предложения.

Материалы и методы. Проанализирован обширный иконографический материал по застройке района Щемиловки и Генеральным планам Ленинграда. Исследование проведено с учётом архивных материалов, иконографических и библиографических источников разных лет. В данной работе был использован ценностный подход к изучению объекта, а также частично применён историко-предметный метод, который учитывает основные этапы проектирования объекта.

В основу метода положено рассмотрение общественно-административного центра Володарского (Невского) района, как ключевого градостроительного элемента в структуре жилых кварталов, которые вместе образуют единую архитектурную среду. Методом анализа и обобщения выявляются и анализируются градостроительные и объёмно-пространственные решения исследуемого объекта, которые влияют на восприятие всего квартала в целом.

Историческая градостроительная роль исследуемого объекта. В ходе изучения исторических материалов, в том числе Генеральных планов, проектных предложений, пояснительных записок и т.д., становится очевидным, что место размещения общественно-административного центра Володарского (совр. Невского) района выбрано неслучайно: на период проектирования и строительства комплекса (1930–1960 годы) это было очень ответственное с градостроительной точки зрения место (рис. 1):

1. Начало главной дуговой магистрали, восточный въезд в город.
2. Соединение двух берегов реки Невы.
3. Узловой элемент на пересечении главной дуговой магистрали и водной артерии – реки Невы.
4. Центральный общественный полифункциональный комплекс района.

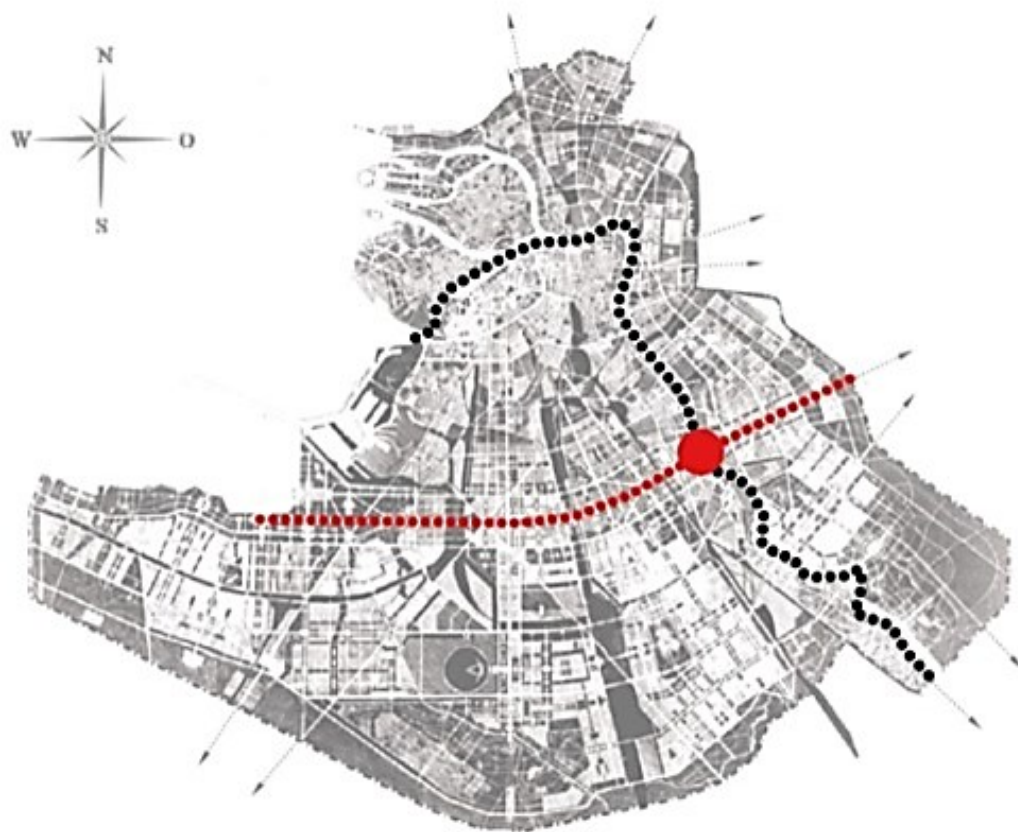


Рис. 1. Схема пересечения главной дуговой магистрали и Невы, место размещения Володарского (Невского) общественно-административного районного центра. На Проекте Генерального плана Ленинграда (1935 г.)

Проектирование общественно-административного центра велось одновременно с проектированием и развитием Володарского (совр. Невского) района. Строительство велось комплексно, согласно Генеральным планам Ленинграда (1935, 1937, 1938–1939–1941, 1948, 1959–1965 гг.) и проектам района Щемиловки.

Общественно-административный районный центр Невского района, как и другие общественно-административные районные центры в новых районах Ленинграда, был задуман, как доминанта подрайона, определяющее «лицо района» и играющее решающую роль в процессе его созидания. [12]

Архитекторами была проделана колоссальная работа по поиску наилучших градостроительных и объёмно-пространственных решений на всех уровнях проектирования: проекты Генеральных Планов, проекты застройки территории, проекты отдельных зданий, которые были взаимосвязаны между собой. Проектирование, строительство и развитие комплекса занимает обширный временной период.

Значимость здания Володарского (Невского) райсовета отражена в законодательных докумен-

тах: он является выявленным объектом культурного наследия [13]. Однако, изучив проектные предложения по застройке района Щемиловки, возникает вопрос в необходимости сохранения не только здания райсовета Володарского (Невского) района, но и всей территории общественно-административного районного центра, как единого комплекса.

Для выявления объёмно-пространственного решения, степени фактической реализации центра, относительно задуманного, а также для определения состава общественно-административного районного центра были проанализированы проектные предложения разных лет всего комплекса и в частности главного его элемента – левобережной площади у Володарского моста.

Проектное градостроительное и объёмно-пространственное решение застройки центра района Щемиловки.

Проекты 1935–1939 гг. К наиболее ранним из рассмотренных проектов относится проект перепланировки и застройки левобережной части Невы (Володарского района) (рис. 2), в котором площадь вытянута вдоль набережной Невы.



Рис. 2. 1935–1936 гг. Проект перепланировки и застройки левобережной части Невы (Володарского района) [14]

Объёмно-пространственное решение площади:

1. Раскрытие на Неву и противоположный берег.
2. Площадь несимметричная в плане, относительно главной дуговой магистрали: прямоугольная южная часть площади и сложная по форме прямоугольная с радиальным завершением северная часть. В северной части площади предполагался сквер. Площадь вытянута вдоль набережной Невы.

3. С севера, юга, и востока, площадь образована 3–4 этажными зданиями, спроектированными по красной линии. С локальным увеличением этажности (доминантами) до 7 этажей. Площадь формировали такие здания, как дом Советов Володарского района, кинотеатр на 800 мест, универмаг, и другие общественные здания.

Проект планировки застройки правого берега Невы у Володарского моста 1935–1936 гг. (рис. 3) охватывает весь комплекс, в том числе левобережную и правобережную площади и Володарский мост.

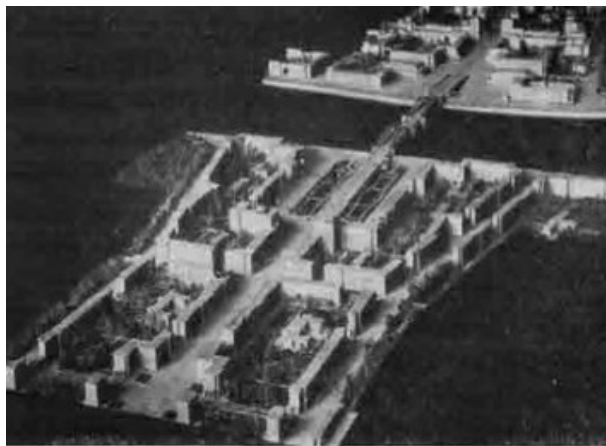


Рис. 3. Планировка застройки правого берега Невы у Володарского моста.
Авторы арх. Дмитриев К.М. и арх. Орлов М.А. 1935–1936 гг. [15]

Объёмно-пространственное решение площадей:

1. Раскрытие площадей на Неву и противоположный берег.

2. Ось симметрии площадей по Володарскому мосту и главной дуговой магистрали.

3. Застройка площадей формируется по красным линиям. Правобережная площадь, прямоугольная в плане, с двумя партерными газонами по обе стороны от съезда с моста. Высота застройки, формирующей правобережную площадь повышается по мере приближения к Неве. Левобережная площадь сложная в плане, состоя-

щая из нескольких прямоугольных объёмов, увеличивающихся в масштабе по мере приближения к Неве.

4. На обеих площадях предполагалось строительство доминант – башен, фланкирующих въезд на главную дуговую магистраль.

Вариант проекта площади у Володарского моста 1937 г. (рис. 4) разработан в 1937 году на основе эскиза, принятого 14 октября 1936 года президиумом Володарского райсовета, АПО утвердил в качестве окончательного. Он частично закреплён в натуре постройкой здания Володарского райсовета [16].



Рис. 4. 1937 г. Проект площади у Володарского моста. Руководитель проф. Витман В.А.
Автор архитектор Волков П.С. [16]

Объёмно-пространственное решение площади:

1. Раскрытие на Неву и противоположный берег,

2. Ось симметрии площади по Володарскому мосту и главной дуговой магистрали. Площадь, сложная в плане, имеет трапециевидную форму и расширяется к мосту радиальными завершениями. Разделена на 3 объёма: трапециевидный

(симметричный, относительно оси) и 2 скруглённых (симметричных, относительно оси) с южной и с северной стороны от моста,

3. С севера, юга, и востока, площадь образована 4–5 этажными зданиями, спроектированными по красной линии. С локальным увеличением этажности (доминантами) до 6 этажей.

В проекте 1935–1940 годов (рис. 5), южнее всего комплекса намечен южный обводный ка-

нал и продолжение улицы (совр. Бульвар Красных Зорь) вдоль канала до Невы, которые не были реализованы.



Рис. 5. 1935–1940 гг. Планировка района Щемиловка. Архитекторы Твардовский П.Н., Левинсон Е.А., Фомин И.И. [17]

Объёмно-пространственное решение площади:

1. Раскрытие площади на Неву и противоположный берег, 2. Ось симметрии площади по Володарскому мосту и главной дуговой магистрали. Площадь сложная в плане разделена на 3 основных объёма: прямоугольные объёмы с северной и с южной стороны от моста и полукруглый объём в восточной части площади, 3. С севера, юга и востока площадь образована 4-5 этажными зданиями, спроектированными по красной ли-

нии. С локальным увеличением этажности (доминантами) до 7 этажей. Доминанты фланкируют въезд на главную дуговую магистраль с площади, формируя парадный въезд в город.

Проект 1939 года (рис. 6) охватывает весь комплекс, в том числе левобережную и правобережную площадь, раскрытые на Неву и Володарский мост. Южнее всего комплекса намечен южный обводный канал и продолжение улицы (совр. Бульвар Красных Зорь) вдоль канала до Невы, которые не были реализованы



Рис. 6. 1939 г. Проект застройки микрорайона Щемиловки. Руководители архитекторы Наумов А.И., Твардовский П.Н.

Авторы: архитекторы Орлов М.А., Волков П.С. Авторы кварталов 3 и 4: архитекторы Левинсон Е.А., Фомин И.И. [18]

Объёмно-пространственное решение площадей:

1. Раскрытие площадей на Неву и противоположный берег, 2. Ось симметрии площадей по Володарскому мосту и главной дуговой магистрали, 3. Левобережная площадь сложная в плане разделена на 3 основных объёма: прямоугольные объёмы с северной и с южной стороны от моста и полукруглый объём в восточной части площади. Застройка левобережной площади формируется преимущественно общественными зданиями по красным линиям.

Правобережная площадь формируется в плане вытянутым прямоугольным объёмом с раскрытием на Неву в западной части.

Послевоенные проекты. К послевоенным проектам, рассмотренным в данной работе, относятся три проекта, разработанные организацией Ленпроект.

Проекты левобережной площади у Володарского моста 1946 и 1951–1952 годов (рис. 7, 8), фактически повторяют друг друга и отличаются только объёмно-пространственным решением некоторых элементов и прорисовкой архитектурного решения застройки.



Рис. 7. 1946 гг. Проект застройки площади у Володарского моста. Перспектива. Ленпроект. Арх.-план. мастерская № 5. Авторы: Акад. Арх. СССР Левинсон Е.А., член-корр. Акад. Арх. СССР Фомин И.И. и арх. Гольдгор Д.С. [19]



Рис. 8. 1951–1952 гг. Проект левобережной площади у Володарского моста. Ленпроект. Арх.-план. мастерская № 5. Авторы: Акад. Арх. СССР Левинсон Е.А., член-корр. Акад. Арх. СССР Фомин И.И. и арх. Гольдгор Д.С. [20]

Объёмно-пространственное решение площади (оба варианта):

1. Раскрытие площади на Неву и противоположный берег, 2. Ось симметрии площади по Володарскому мосту и главной дуговой магистрали. Площадь, сложная в плане разделена на 3 основных объёма: прямоугольные объёмы с северной и с южной стороны от моста с трассами у предмостового пандуса и полукруглый объём в восточной части площади, 3. С севера и с юга, площадь образована 4-5 этажными общественными зданиями Райсовета и института, спроектированными по красной линии. С восточной стороны закруглённая часть площади формируется жилой 4-5 этажной застройкой с локальным увеличением этажности (доминантами), объёмными акцентами, до 7 этажей. Доминанты фланкируют въезд на главную дуговую магистраль с площади, формируя парадный въезд в город.

Проект левобережной площади у Володарского моста 1950-х годов (рис. 9) отличается от предыдущей конфигурации самой площади.

Объёмно-пространственное решение площади:

1. Раскрытие на Неву и противоположный берег.

2. Ось симметрии площади по Володарскому мосту и главной дуговой магистрали остаётся.

3. Площадь уменьшена, относительно предыдущего варианта: вместо полукруглого завершения намечены прямоугольные в плане здания, формирующие западную сторону площади. Южнее Володарского моста намечено строительство общественного здания, которое не было осуществлено. Южнее всего комплекса намечен южный обводный канал и продолжение улицы (совр. Бульвар Красных Зорь) вдоль канала до Невы, которые не были реализованы. В остальном, габариты площади, её объёмно-пространственное решение были реализованы следуя данной схеме застройки.

В ходе исследования на основании проектных вариантов определён основной состав общественно-административного центра.

В состав комплекса входят: две площади на правом и левом берегах Невы, раскрытые на неё и связанные Володарским мостом; участки набережной левого берега, примыкающие к площади.

На северном участке левобережной площади у Володарского моста выходит здания районного Совета с садом при нём; большой зелёный массив, примыкающий к парку Куракина дача, связанный с левобережной площадью отрезком дуговой магистрали – Ивановской улицей и южным участком набережной.

Зелёный массив – сад им. Бабушкина с Домом культуры, по своему назначению, как районное общественное место отдыха, мог бы быть элементом центра. Но большое расстояние не позволяет включить его в состав композиции центра, так как сад им. Бабушкина территориально сильно разобщён с элементами центра.

Особенность центра Невского района – построение его на двух берегах Невы. Чёткое структурное и композиционное объединение этих площадей – ядро центра. Главный элемент – левобережная площадь.



Рис. 9. Проект застройки площади у Володарского моста. Ленпроект. Арх.-план. мастерская № 5. Авторы: Акад. Арх. СССР Левинсон Е.А., член-корр. АКАД. Арх. СССР. Гольдгор Д.С., Емельянов, Щедрин 1950-е [21]

Существующее объёмно-пространственное решение всего комплекса:

Осуществлены обе площади, имеющие раскрытые на Володарский мост. Центр размещён на пересечении главной магистрали района – Ивановской улицы и Невы, как и было задумано первоначально.

Однако в связи с длительным периодом реализации, объёмно-пространственное, стилистическое, архитектурное решение площадей и формирующей их застройки, а также степень реализации, относительно проектных предложений различные.

Существующее объёмно-пространственное решение главного элемента общественно-административного центра – левобережной площади:

Ось симметрии левобережной площади проходит по Володарскому мосту и Ивановской улице. Площадь состоит из двух трапециевидных

участков с газонами с севера и с юга от Володарского моста, ограниченных со всех сторон магистралями.

С южной стороны к площади примыкает большой зелёный массив, который в свою очередь примыкает к парку Куракина дача.

С восточной стороны площадь образована двумя симметричными восьмиэтажными зданиями с мансардным этажом без высотных акцентов в виде доминант (которые были намечены по проекту 1940-х годов) по адресу: Ивановская ул., д. 6 и Ивановская улица, д. 7. Выстроенными по проекту архитекторов Левинсона Е.А., Гольдгора Д.С. в 1962 году. Их строительство относится к более позднему периоду, чем застройка Ивановской улицы и строительство здания Райсовета. Объёмно-пространственное решение данных объектов отличается от ранних вариантов отсутствием доминант, фланкирующих въезд на

Ивановскую улицу. Тем не менее застройка жилых домов по красным линиям формирует западную сторону левобережной площади и соответствует задуманному в 1950 годы решению по застройке площади.

С северной стороны к площади примыкает сквер и здание администрации Невского района, которое формирует северо-восточный угол площади.

С западной стороны левобережная площадь примыкает к набережной Невы.

Реконструкция Володарского моста (1988–1993 гг.) и создание трамвайной эстакады, значительно изменили визуальное восприятие всего комплекса. Однако районная значимость общественно-административного центра сохранилась: он по-прежнему является узловым элементом на пересечении Ивановской улицы и р. Невы, связывает 2 берега Невы, является крупной транспортной развязкой и выполняет общественно-административные функции.

Ценные элементы общественно-административного комплекса. На основании вышесказанного, можно выделить ценные элементы общественно-административного комплекса:

I. Градостроительные.

1. Соединение левого-правого берега Невы: связь прослеживается, как в проектных предложениях, так и в реализованном проекте, 2. Связь с районом (как в проектных предложениях, так и в реализованном проекте), 3. Увязка застройки с окружающими её зелёными и водными пространствами и с главной магистралью района, как в проектных предложениях, так и в реализованном проекте

II. Объёмно-пространственные характеристики комплекса.

1. Обе площади имеют раскрытие к Неве и Володарскому мосту, что соответствует первоначальной задумке.

2. Осью симметрии площадей является Володарский мост и главная дуговая магистраль (Ивановская улица), что соответствует историческим проектным предложениям.

3. Объёмно-пространственное решение левобережной площади имеет отличия, относительно ранних проектных решений: нет чётко сформированной красной линии застройки с северной и южной стороны. С северной стороны это частично компенсируется экранирующим озеленением сквера. Объёмно-пространственное решение левобережной площади соответствует проекту застройки района Щемиловки 1950 – годов, однако включает в себя идеи ранних проек-

тных предложений: формирование площади общественными зданиями (райсовет Володарского (совр. Невского)) района, памятник В. Володарскому, наличие рекреационной зоны. Здание райсовета на данный момент – отдельно стоящее. Тем не менее здание райсовета, площадь, памятник В. Володарскому и зелёные насаждения – осуществлённые элементы задуманного комплекса левобережной площади.

4. Правобережная площадь имеет периметральную застройку по красным линиям. По обе стороны от оси главной магистрали расположены доминанты – высотные жилые здания, что соответствует идеям, заложенным в проектных предложениях.

III. Архитектурные особенности зданий.

Два наиболее значимых здания, фланкирующие въезд на левобережную площадь, были построены в 1958–1961 гг. Их объёмно-пространственное решение отличается от проектного решения 1940 годов отсутствием башен, этажностью и конфигурацией. Тем не менее они выступают в качестве фоновой застройки левобережной площади и организуют её границу с западной стороны, согласно проекту Е.А. Левинсона.

Выводы. На сегодняшний день застройка имеет признаки историко-культурной, художественной, эстетической значимости с уникальными стилистическими особенностями.

Наличие высокой сохранности исторической планировочной структуры территории, а также сохранность материальных элементов (таких как здание райсовета Володарского (Невского) района и памятник В. Володарскому), дают основание предположить, что сохранение фактически реализованного общественно-административного районного центра возможно, путём отнесения его к объекту культурного наследия, достопримечательному месту.

В настоящее время на территории левобережной площади, согласно Приложению 2 к Закону Санкт-Петербурга «О границах зон охраны объектов культурного наследия на территории Санкт-Петербурга и режимах использования земель в границах указанных зон» и о внесении изменений в Закон Санкт-Петербурга «О Генеральном плане Санкт-Петербурга и границах зон охраны объектов культурного наследия на территории Санкт-Петербурга» от 24 декабря 2008 года № 820-7 установлена зона регулирования застройки и хозяйственной деятельности (ЗРЗ(12) 02) и охраняются единичные объекты (здание Володарского (Невского) райсовета, памятник В. Володарскому, ансамбль Ивановской улицы) (рис. 10).



Рис. 10. Существующее охрannое зонирование

На основании проанализированных исторических материалов, проектных предложений, и существующей высокой сохранности исторической среды, предложены новые границы охраны всего комплекса, в том числе левобережной и

правобережной площади, а также Володарского моста, как единого ансамбля, а также выделена главная композиционная ось всего комплекса (рис. 11).



Рис. 11. Проектное охрannое зонирование с предлагаемыми границами всего комплекса и с выделенной главной композиционной осью

Данные мероприятия направлены на сохранение не только материальных элементов общественно-административного районного центра Володарского района, но и нематериальных, таких как осевая композиция комплекса, раскрытие левобережной и правобережной площадей на Неву, сохранение градостроительного ядра комплекса (площадей и Володарского моста).

В границах охрannого зонирования, относящихся ко всему комплексу, следует установить ограничения, касающиеся изменения внешнего облика объектов, сохранения главной оси – Ивановской улицы и Володарского моста, сохранение основных визуальных направлений для обеспечения целостности всего комплекса общественно-административного центра районного значения Володарского (Невского) района, являющегося частью уникальной градостроительной и архитектурной системы общественно-административных районных центров.

Развитие данной территории так же возможно путём внедрения современного подхода к организации общественного пространства. Данная тема описана во многих публикациях таких авторов, как Жоголева А.В. [22], Ненько А.С. [23], Райхель Ю.Л. [24], и актуальна для применения к общественно-административному центру Володарского района.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Н.В. Силуэт города. Л.: Стройиздат: Ленингр. отделение, 1980. 183 с.
2. Витман А.А. Градостроительные проблемы развития Ленинграда. Л.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1960. 159 с.

3. Вайтенс А.Г. Генеральные планы развития Ленинграда 1930–1950 гг. Опыт и итоги реализации // Вестник гражданских инженеров, 2011. № 3. С. 6–14.
4. Каменский В.А., Наумов А.И. Ленинград. Градостроительные проблемы развития города. Л.: Стройиздат, 1973. 360 с.
5. Кириков Б.М. Архитектура Петербурга-Ленинграда: страницы истории. СПб.: Коло, 2014. 397 с.
6. Лисовский В.Г. Санкт-Петербург. Очерки архитектурной истории города в 2 т. СПб.: Коло, 2009. 584 с.
7. Семенцов С.В. Градостроительное развитие Санкт-Петербурга в XX – начале XXI вв.: генеральные планы, территориальное планирование и закономерности реализации // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 4(13). С. 5–11.
8. Костова Е.В. Концептуальные основы советской архитектуры сталинского периода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. №23(4). С. 9–18.
9. Ильвицкая С.В., Комиссаров А.В. Динамическая архитектура многофункциональных общественных центров // Вестник ТГАСУ. 2023. №25(2). С. 65–74.
10. Семенцов С.В. Цикличность градостроительного развития Санкт-Петербурга. Особенности разработки генеральных планов и градостроительного управления // Вестник гражданских инженеров. 2004. № 1. С. 45–52
11. ЦГАЛИ Ф347 Оп2 Д33
12. Ильин Л.А. План развития Ленинграда, и его архитектура // Архитектура Ленинграда. 1936. №1. С. 18–33.
13. Приказ председателя КГИОП № 15 от 20.02.2001.
14. ЦГАИПД СПб. [Электронный ресурс]. URL: https://spbarchives.ru/web/group/bridges_3_2 (дата обращения 24.03.2024)
15. Симонов Г.А. Планировка жилых кварталов // Архитектура Ленинграда. 1938. №2. С. 36–38.
16. Волков П.С. Площадь Володарского районного центра // Архитектура Ленинграда. 1939. №3. С. 32–35.
17. Ленинград. Архитектурно-планировочный обзор развития города 1943. Под редакцией Н. В. Баранова, В. А. Каменского, М. В. Морозова и др. Л.: Издательство: Искусство. 304 с.
18. Баранов Н.В. Славное пятилетие // Архитектура Ленинграда. 1940. №5 С. 6-12.
19. Крылов В.К. В городском архитектурном совете // Архитектура Ленинграда. 1947. №1 С. 28–43.
20. ЦГА НТД Ф17 О 2-3 Д 52.
21. Витман В.А. Ленинград: Планировка и застройка. 1945-1957. Л.: Госстройиздат. Ленингр. отд-ние, 1958. 103 с.
22. Жоголева А.В., Солкин Д.К. Тактический урбанизм как инструмент преобразования общественных пространств // Innovative Project. 2021. Т. 6. № 12. С. 50–58. DOI 10.17673/IP.2021.6.12.6
23. Nenko A., Kurilova M., Podkorytova M. Emotional Street Network: A Framework for Research and Evidence Based on PPGIS // Networks in the Global World V: Proceedings of NetGloW 2020, Санкт-Петербург, 07–09 июля 2020 года. Санкт-Петербург: Springer Link, 2021. Pp. 133–143. DOI 10.1007/978-3-030-64877-0_9
24. Raikhel Y.L., Zobova M.G. Culture of Pedestrian Public Spaces // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 227. Pp. 119–130. DOI 10.1007/978-3-030-94770-5_9

Информация об авторах

Какунец Ксения Викторовна, аспирант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: kkakunets@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 14.02.2024 г.

© Какунец К.В., 2024

Kakunets K.V.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: Kkakunets@mail.ru

THE SOCIAL AND ADMINISTRATIVE CENTER OF THE VOLODARSKY (NEVSKY) DISTRICT OF ST. PETERSBURG. PROJECTS AND ACTUAL IMPLEMENTATION. FEATURES OF URBAN PLANNING AND SPATIAL SOLUTIONS

Abstract. The urban planning feature of the development of the socio-administrative district center of the Volodarsky (Nevsky) district consists in the ensemble construction of its composition. Despite numerous changes in design decisions and the long-term implementation of the project, the urban planning potential

inherent in the design of this center can be traced in its modern structure, as well as in the structure of the entire Nevsky district and the city as a whole. This urban planning composition is relevant for the study and formation of proposals for the preservation of the public center, as a single urban planning composition. The availability of design materials from different years, including General Plans of Leningrad and design proposals for the development of the territory of the Shchemilovka district in 1930-1960, as well as field studies allow us to analyze the conceived and implemented urban planning and spatial features of this complex and identify the features of the formation of the public administrative center of the Volodarsky (Nevsky) district in the city of St. Petersburg. The purpose of this study is to identify the key urban planning and spatial features that influenced the development of the public administrative center of the Volodarsky (Nevsky) district. This study is the basis for further work on improving security items for the public administrative district center of Volodarsky (Nevsky) district.

Keywords: Social and administrative center, Volodarsky district, Nevsky district, urban planning composition, district council.

REFERENCES

1. Baranov N.V. The silhouette of the city [Siluetgoroda]. L.: Stroyizdat: L.otdelenie, 1980. 183 p.(rus)
2. Vitman A.A. Urban planning problems of Leningrad development [Gradostroitel'nye problem razvitiya Leningrada]. L.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, arhitekture i stroitel'nym materialam, 1960. 159 p.(rus)
3. Vaytens A.G. General plans for the development of Leningrad 1930-1959 years. Experience and results of implementation [General'nye plany razvitiya Leningrada 1930-1950 g.g. Opyt i itogi realizacii]. Bulletin of Civil Engineers. 2011. No. 3. Pp. 6–14. (rus)
4. Kamenskiy V.A., Naumov A.I. Leningrad. Leningrad. Urban development problems of the city. [Gradostroitel'nye problem razvitiya goroda]. L.: Stroyizdat, 1973. 360 p.(rus)
5. Kirikov B.M. Architecture of St. Petersburg-Leningrad: pages of history [Arhitektura Peterburga-Leningrada: stranicystorii]. SPb.: Kolo, 2014. 397p.(rus)
6. Lisovskiy V.G. Saint-Petersburg. Essays on the architectural history of the city: in 2 vols [Sankt-Peterburg. Ocherki arhitekturnoy istorii goroda: v 2 t.]. SPb.: Kolo, 2009. 584 p.(rus)
7. Semencov S.V. Urban development of St. Petersburg in the XX-early XXI centuries: master plans, territorial planning and patterns of implementation [Gradostroitel'noe razvitie Sankt-Peterburga v XX – nachale XXI vv.: general'nye plany, territorial'noe planirovanie i zakonomernosti realizacii]. Bulletin of Civil Engineers. 2007. No. 4(13). Pp. 5–11. (rus)
8. Kostova E.V. The conceptual foundations of Soviet architecture of the Stalinist period. [Konceptual'nye osnovy sovetskoy arhitektury stalinskogo perioda]. Tomsk State University Journal. 2021. No. 23(4). Pp. 9–8. (rus)
9. Il'vickaya S.V., Komissarov A.V. Dynamic architecture of multifunctional community centers [Dinamicheskaya arhitektura mnogofunkcional'nyh obschestvennyh centrov]. Tomsk State University Journal. 2023. No.25(2). Pp. 65–74. (rus)
10. Semencov S.V. The cyclical nature of the urban development of St. Petersburg. Features of the development of master plans and urban management [Ciklichnost' gradostroitel'nogo razvitiya Sankt-Peterburga. Osobennosti razrabotki general'nyh planov i gradoupravleniya]. Bulletin of Civil Engineers. 2004. No.1. Pp. 45–52. (rus)
11. CGALI F 347 Op 2 D 33. (rus)
12. Il'in L.A. Leningrad development plan and its architecture [Plan razvitiya Leningradai ego arhitektura]. Arhitektura Leningrada. 1936. No. 1. Pp. 18–33. (rus)
13. Prikaz predsedatelya KGIOP № 15 ot 20.02.2001 (rus)
14. CGAIPD SPB. URL: https://spbarchives.ru/web/group/bridges_3_2 (date of treatment: 24.03.2024) (rus)
15. Simonov G.A. The layout of residential areas [Planirovka zhilyh kvartalov]. Arhitektura Leningrada. 1938. No.2. Pp. 36–38. (rus)
16. Volkov P.S. The area of the Volodarsky district center [Ploschad' Volodarskogo rayonnogo centra]. Arhitektura Leningrada. 1939. No. 3. Pp. 32–35. (rus)
17. Leningrad. Architectural and planning review of the city development in 1943 [Arhitekturno-planirovochnyy obzor razvitiya goroda 1943]. Edited by N. V. Baranov, V.A. Kamenskiy, M.V. Morozov L.: Izdatel'stvo: Iskusstvo. 304 p.(rus)
18. Baranov N.V.A Nice fifth anniversary [Slavnoe pyatiletie]. Arhitektura Leningrada. 1940. No. 5. Pp. 6–12. (rus)
19. Krylov V.K. At the City Architectural Council [V gorodskom arhitekturnom sovete]. Arhitektura Leningrada. 1947. No.1 Pp. 28–43. (rus)
20. CGA NTD F 17 O 2-3 D 52 (rus)
21. Vitman V.A. Leningrad: Planning and construction. 1945-1957 [Leningrad: Planirovka i zastroyka. 1945-1957]. Akad. stroitel'stva i arhitektury SSSR. Leningr. Filial. L.: Gosstroyizdat. Leningr. otd-nie, 1958. 103 p. (rus)

22. Zhogoleva A. V., Solkin D.K. Tactical urbanism as a tool for transforming public spaces [Takticheskiy urbanizm kak instrument preobrazovaniya obshchestvennykh prostranstv]. Innovative Project. 2021. Vol. 6. No 12. Pp. 50–58. DOI 10.17673/IP.2021.6.12.6. (rus)

23. Nenko A. Emotional Street Network: A Framework for Research and Evidence Based on PPGIS. A. Nenko, M. Kurilova, M. Podkorytova.

Networks in the Global World V: Proceedings of NetGloW 2020, Sankt-Peterburg, 07–09 iyulya 2020 goda. Sankt-Peterburg: Springer Link, 2021. Pp. 133–143. DOI 10.1007/978-3-030-64877-0_9

24. Raikhel, Y.L., Zobova M.G. Culture of Pedestrian Public Spaces. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 227. Pp. 119–130. DOI 10.1007/978-3-030-94770-5_9

Information about the authors

Kuznetsov, Ilya V. Lecturer of the Urban Planning Chair, Postgraduate Student of the Urban Planning Chair. E-mail: elias96@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hwy., 26.

Received 14.02.2024

Для цитирования:

Какунец К.В. Общественно-административный центр Володарского (Невского) района Санкт-Петербурга. Проекты и фактическая реализация. Особенности градостроительного и объёмно-пространственного решения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №6. С. 76–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-76-87

For citation:

Kakunets K.V. The social and administrative center of the Volodarsky (Nevsky) district of St. Petersburg. Projects and actual implementation. Features of urban planning and spatial solutions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 6. Pp. 76–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-76-87

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-88-97

**Фомина И.В., Капустин Ф.Л.*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**E-mail: irina.fomina@urfu.ru*

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ НА ГИДРАТАЦИЮ И ТВЕРДЕНИЕ ЗОЛОЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Исследовано влияние минеральных добавок, вводимых в количестве 20 % взамен части золы-уноса, на состав продуктов гидратации и твердение золоцементного камня после тепловлажностной обработки. Наибольший прирост прочности на сжатие золоцементного камня обеспечивает применение молотого шлака доменного гранулированного и отсева дробления горнблэндита, введение которых увеличивает ее в 2 раза по сравнению с бездобавочным камнем. Дифференциально-термическим анализом золоцементного камня установлено, что в присутствии доменного шлака основность низкоосновных гидросиликатов кальция состава CSH(V) снижается, а их количество увеличивается в результате связывания портландита с активными компонентами добавки и алюмосиликатным стеклом золы-уноса. Повышенное содержание низкоосновных гидросиликатов кальция способствует увеличению прочности на сжатие золоцементного камня. Добавка отсева дробления горнблэндита не изменяет состав гидратных новообразований, а увеличение его прочности обусловлено высокими плотностью и прочностью частиц горной породы. Введение медеплавильного шлака взамен части золы не способствует увеличению содержания гидратных новообразований в золоцементном камне, так как его компоненты не взаимодействуют с продуктами гидратации портландцемента, а отсутствие гидравлической активности обусловлено низким содержанием в нем оксидов кальция и алюминия, присутствием в значительном количестве химически инертных фаялита и стеклофазы. Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить эффективность влияния некоторых минеральных добавок на прочность золоцементного камня с целью увеличения объемов и рационального использования золы-уноса тепловых электростанций в составе композиционных материалов, при производстве искусственных пористых заполнителей, например, безобжигового зольного гравия.

Ключевые слова: зола-уноса, минеральная добавка, золоцементный камень, гидратация, прочность.

Введение. Необходимость в разработке и внедрении строительных композитов на основе комплексного использования отходов промышленности обусловлена ухудшением экологической обстановки во многих регионах России, связанных с образованием и складированием в отвалах значительных объемов техногенных продуктов, а также значительным ростом цен на многие строительные материалы и изделия, в частности, цементы и природные заполнители бетонов и растворов. Более активное применение техногенных отходов позволяет расширить минерально-сырьевую базу строительной индустрии. В современных условиях строительства для снижения расхода цемента, модифицирования и улучшения структуры бетонов и растворов в качестве добавок используются следующие виды техногенных отходов:

– основные доменные гранулированные шлаки и высококальциевые золы-уноса – обладают способностью к самостоятельному твердению [1–3];

– кислые доменные шлаки и золы – взаимодействуют с портландитом, образуя при

гидратации цемента, повышая прочность и коррозионную стойкость строительных композитов [4–6];

– отсева дробления горных пород – не вступают в химические реакции с продуктами гидратации цемента при нормальной температуре твердения, но улучшают структуру бетона и раствора [7, 8].

Наполнение составов цементов тонкодисперсными минеральными материалами с одновременным повышением их физико-механических свойств является одним из перспективных направлений уменьшения себестоимости цементов. В последние годы подходы к разработке составов цементов стали пересматриваться и изменяться.

В строительной индустрии накоплен значительный опыт по применению золошлаковых отходов теплоэнергетики и металлургических шлаков качестве минеральной добавки в производстве портландцемента и бетона; и как основного сырьевого компонента при изготовлении композиционных материалов, таких как, автоклавный газозолобетон, безобжиговый зольный гравий,

зольный силикатный кирпич и других изделий с содержанием золы более 50 %. Стандарт ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» допускает использование золы-уноса в составе различных типов цемента как в качестве основного компонента минеральной добавки в количестве от 6 до 35 %, так и вспомогательного компонента – до 5 %. Например, в состав портландцемента с минеральной добавкой ЦЕМ II допускается вводить до 20 % золы-уноса, пуццоланового цемента – от 21 до 35 %, а в расширяющемся цементе, в котором количество портландцемента составляет до 55 %, известь и сиштоф – до 18 %, а зола-уноса – до 27 %.

При переработке горных пород в нерудные строительные материалы и обогащении железорудного сырья образуются попутные продукты в виде отсеков их дробления и дисперсных хвостов обогащения. Основная их масса складывается на складах готовой продукции предприятий или вывозится в отвалы, в карьеры, что препятствует развитию горных работ. Применение данных отходов в качестве минеральной добавки или наполнителя в составе многокомпонентных цементов обусловлено их химическим и минералогическим составами, физико-механическими свойствами. Существенным недостатком отсеков дробления является высокое содержание в них пылевидной фракции, что увеличивает расход цемента в бетонах и строительных растворах. Из-за низкой стоимости и высоких транспортных расходов отсеки дробления горных пород в основном рассматриваются как местное сырье. Однако, их применение в качестве минеральной добавки может существенно улучшить прочностные характеристики строительных композиционных материалов. В научно-технической литературе основное внимание уделяется использованию высокопрочных горных пород (диабаз, габбро, порфирит, кварцевый песок, гранит, гранодиорит), способствующих увеличению прочности цементного камня [7–10].

Анализ научно-технической литературы показал, что строительные зольные композиты, содержащие до 20 % портландцемента, недостаточно изучены. В то же время, как правило, высокое количество золы в золоцементном камне (ЗЦК) не только замедляет гидратацию и твердение цемента, но и снижает физико-механические свойства изделий на его основе. Поэтому для ускорения твердения в состав ЗЦК вводят химические добавки. Для улучшения его свойств целесообразно рассмотреть возможность дополнительного введения минеральных добавок, исследовать влияние их вида на гидратацию и твердение ЗЦК.

Целью работы является исследование влияния добавки металлургических шлаков и отсева дробления горной породы горнблендита на состав и свойства ЗЦК.

Для достижения поставленной цели в исследовании необходимо было решить следующие задачи:

- определить химико-минеральный состав использованных в работе материалов;
- установить влияние вида минеральных техногенных добавок на прочность ЗЦК после пропаривания;
- определить состав гидратных новообразований в ЗЦК, содержащем разные минеральные добавки.

Материалы и методы. Химический состав использованных в работе материалов определяли по ГОСТ 5382-2019 «Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа»; гидравлическую активность минеральных добавок оценивали по коэффициенту качества. Чем выше значение коэффициента качества, тем гидравлически активнее доменный и электротермофосфорный гранулированные шлаки. Коэффициент качества исследуемых минеральных добавок рассчитывали с учетом их химического состава по формуле:

$$K = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2}, \quad (1)$$

где CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, TiO₂ – содержание оксидов кальция, кремния, алюминия, марганца и титана, мас. %.

Золоцементную смесь готовили смешиванием в лабораторном смесителе 60 % золы-уноса, 20 % портландцемента и 20 % минеральной добавки. Для ускорения твердения в золоцементную смесь вместе с водой затворения вводили сульфат натрия в количестве 2 % от массы цемента.

Для исследования влияния вида минеральной добавки на физико-механические свойства ЗЦК и продукты гидратации из теста были изготовлены образцы-кубы размерами 2×2×2 см, которые пропаривали по режиму: 3 ч – подъем температуры, 6 ч – изотермическая выдержка при 85 °С, 3 ч – охлаждение. Затвердевшие образцы ЗЦК испытывали на прочность на сжатие и, затем, из них готовили пробы для определения состава продуктов гидратации.

Минеральный состав сырьевых материалов и продуктов твердения ЗЦК определяли рентгенофазовым и дифференциально-термическим анализами. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD 7000 Maxima Shimadzu (Япония) при CuK α излучении в диапазоне углов

рассеяния 2θ от 10 до 70°. Расшифровку дифрактограмм проводили с использованием базы данных PDF-4. Дифференциально-термические и термогравиметрические исследования проб золоцементного камня выполняли на дифференциальном сканирующем калориметре STA 449F фирмы «Netzsch GmbH» (Германия) в интервале температуры 20-1200 °C со скоростью нагрева образцов 10 °C/мин.

Состав и свойства сырьевых материалов.

В исследовании использовали золу-уноса Рефтинской ГРЭС (АО «Кузбассэнерго», Свердловская область, п. Рефтинский) ТУ 5717-004-79935691-2009, образующейся при сжигании каменного угля Экибастузского бассейна (Республика Казахстан), портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия» производства ООО «СЛК

Цемент» (Свердловская область, г. Сухой Лог), в качестве минеральной добавки применяли шлак молотый доменный гранулированный ООО «Мечел-Материалы» ТУ 0799-001-99126491-2013, шлак медеплавильный гранулированный ПАО «Среднеуральский медеплавильный завод» ТУ 48-0328-27-97 и отсеив дробления горнблендита, образующийся при получении щебня на ОАО «Первоуральское рудоуправление».

Определены химический состав, плотность и удельная поверхность золы-уноса Рефтинской ГРЭС (таблица 1). Установлено, что по химическому составу зола является кислой, состоит в основном из сферических частиц (рис.1), ее минеральный состав представлен в основном стеклофазой, муллитом и кварцем, исследованная проба золы удовлетворяет требованиям технических условий ТУ 5717-004-79935691-2009.

Таблица 1

Состав и свойства золы-уноса Рефтинской ГРЭС

Наименования показателей, единица измерения	Фактические значения	Требования ТУ 5717-004-79935691-2009
Потеря массы при прокаливании, мас. %	1,68	Не более 5,00
Содержание оксида кальция, мас. %	1,33	Не более 10,00
Содержание оксида магния, мас. %	2,32	Не более 5,00
Содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO ₃ , мас. %	0,14	Не более 5,00
Содержание оксида натрия, мас. %	0,41	Не более 1,5
Содержание оксида калия, мас. %	0,53	Не более 1,5
Удельная поверхность, м ² /кг	355	Не менее 150
Истинная плотность, кг/м ³	2220	-
Насыпная плотность, кг/м ³	785	-

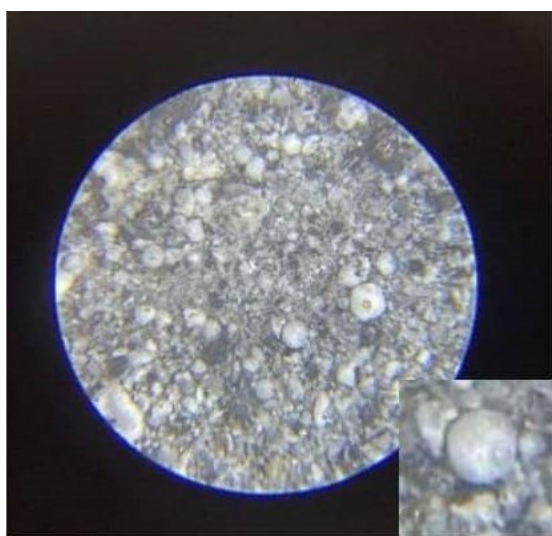


Рис. 1. Внешний вид частиц золы-уноса Рефтинской ГРЭС: увеличение x100

Выбор гранулированных шлаков черной и цветной металлургии и отсева дробления горнблендита для использования в качестве минеральной добавки в составе золоцементной смеси

был обусловлен улучшением физико-механических свойств портландцемента и извести при их введении [9-12]. Горная порода горнблендит по своим характеристикам имеет высокую прочность на сжатие до 120 МПа, морозостойкость F300, а химический состав представлен оксидами кремния, железа, алюминия и кальция. Главным породообразующим минералом горнблендитов является роговая обманка [5]. Исходя из физико-механических свойств горной породы горнблендита, представляется возможным рассмотреть использование отсева дробления горной породы в качестве минеральной добавки.

В таблице 2 представлен химический состав техногенных отходов, использованных в работе в качестве минеральной добавки. Химический состав доменного шлака представлен в основном оксидами кремния, кальция и алюминия; отсева дробления горнблендита – оксидами кремния, железа, алюминия и кальция; медеплавильного шлака – оксидами кремния, железа и алюминия.

Таблица 2

Химический состав минеральных добавок

Минеральная добавка	$\Delta m_{\text{прк}}$, мас. %	Содержание оксидов, мас. %											Коэффициент качества добавки
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Пр.	
Шлак доменный гранулированный	0,34	37,88	12,90	0,56	0,46	–	9,14	35,36	0,01	0,87	0,80	2,02	1,49
Отсев дробления горнблэндита	3,03	40,92	15,98	1,14	14,42	–	10,83	11,52	1,84	0,31	сл.	0,51	0,94
Шлак медеплавильный гранулированный	1,13	35,80	7,78	0,26	10,01	35,76	1,09	0,97	0,83	0,82	2,50	4,18	0,27

Примечание: $\Delta m_{\text{прк}}$ – потери массы при прокаливании, мас. %

Согласно ГОСТ 3476-2019 «Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов» доменные и электротермофосфорные гранулированные шлаки для использования в составе цементов в зависимости от их химического состава и коэффициента качества разделяют на три сорта 1, 2 и 3 (соответственно коэффициент качества – не менее 1,65, 1,45 и 1,20). Показано, что значение коэффициента качества для исследованных минеральных добавок увеличивается в ряду шлак медеплавильный ($K=0,27$) → отсев дробления горнблэндита (0,94) → шлак доменный (1,49), тем самым характеризуя повышение их гидравлической активности.

Установлено, что шлак доменный гранулированный представлен в основном стекловидной фазой, которая с учетом его химического состава имеет мелилитовый состав, а также минералами окерманит и шпинель. Отсев дробления горнблэндита содержит роговую обманку, шамозит и анортит, а шлак медеплавильный гранулированный, кроме стекла, представлен фаялитом и магнетитом.

Результаты исследования. Состав и физико-механические свойства ЗЦК после теп-

ловлажностной обработки представлены в таблице 3. Установлено, что вид вводимой минеральной добавки влияет на водопотребность золоцементного теста, плотность и прочность ЗЦК. При введении доменного или медеплавильного шлака расход воды снижается на 15 %, отсева дробления горнблэндита – 21 %. Наибольшую плотность по сравнению с бездобавочным составом имеет ЗЦК, содержащий шлак доменный, наименьшую – при введении медеплавильного шлака. Добавка шлака доменного в количестве 20 % повышает плотность камня до 1843 кг/м³, а при введении такого же количества шлака медеплавильного она составляет 1682 кг/м³. Показано, что прочность на сжатие ЗЦК возрастает с увеличением как плотности камня, так и значения коэффициента качества добавки. Так, добавка доменного шлака, имеющего K , равный 1,49, увеличивает прочность камня в 2,7 раза, отсева дробления горнблэндита с $K=0,94$ – в 2,05 раза, шлака медеплавильного ($K=0,27$) – только на 47,7 %. Таким образом, наибольшую прочность на сжатие имеет ЗЦК, содержащий в качестве минеральной добавки шлак доменный гранулированный или отсев дробления горнблэндита.

Таблица 3

Влияние вида минеральных добавок на плотность и прочность золоцементного камня

№ п/п	Минеральная добавка	Водотвердое отношение	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа
1	Без добавки	0,46	1522	4,4
2	Шлак доменный гранулированный	0,38	1843	11,9
3	Отсев дробления горнблэндита	0,40	1687	9,0
4	Шлак медеплавильный гранулированный	0,38	1682	6,5

С целью установления причин, вызывающих повышение прочности ЗЦК при введении исследуемых минеральных добавок, с помощью дифференциально-термического анализа был определен состав его гидратных новообразований, результаты которого представлены на рисунке 2. Показано, что эндотермический эффект с максимумом при температуре 118,7 °С, расположен-

ный на термограмме ЗЦК из золы-уноса и портландцемента, обусловлен удалением гидратной воды из гидросульфоалюминатов кальция, а последующий эндоэффект при 170 °С связан с частичным обезвоживанием тоберморитового геля и дегидратацией гидросиликата кальция состава CSH(B) (рис. 2, а). По сравнению с цементным камнем дегидратация гидросульфоалюмината

кальция в ЗЦК происходит при более низкой температуре, а разложение тоберморитового геля смещается в высокотемпературную область, что может быть обусловлено образованием в его растворе низкоосновного гидросиликата кальция состава CSH(B) в результате связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющегося при гидролизе C_3S , с алюмосиликатным стеклом золы [13]. Согласно работе

[14] гидросиликаты состава CSH(B) представлены закристаллизованными тоберморитоподобными гидросиликатами кальция с отношением CaO/SiO_2 менее 1,5 и переменным количеством воды, характеризующиеся ступенчатой дегидратацией в области температур от 100 до 790 °C и наличием экзотермического эффекта при 800–900 °C, свидетельствующего об образовании продукта их обезвоживания волластонита.

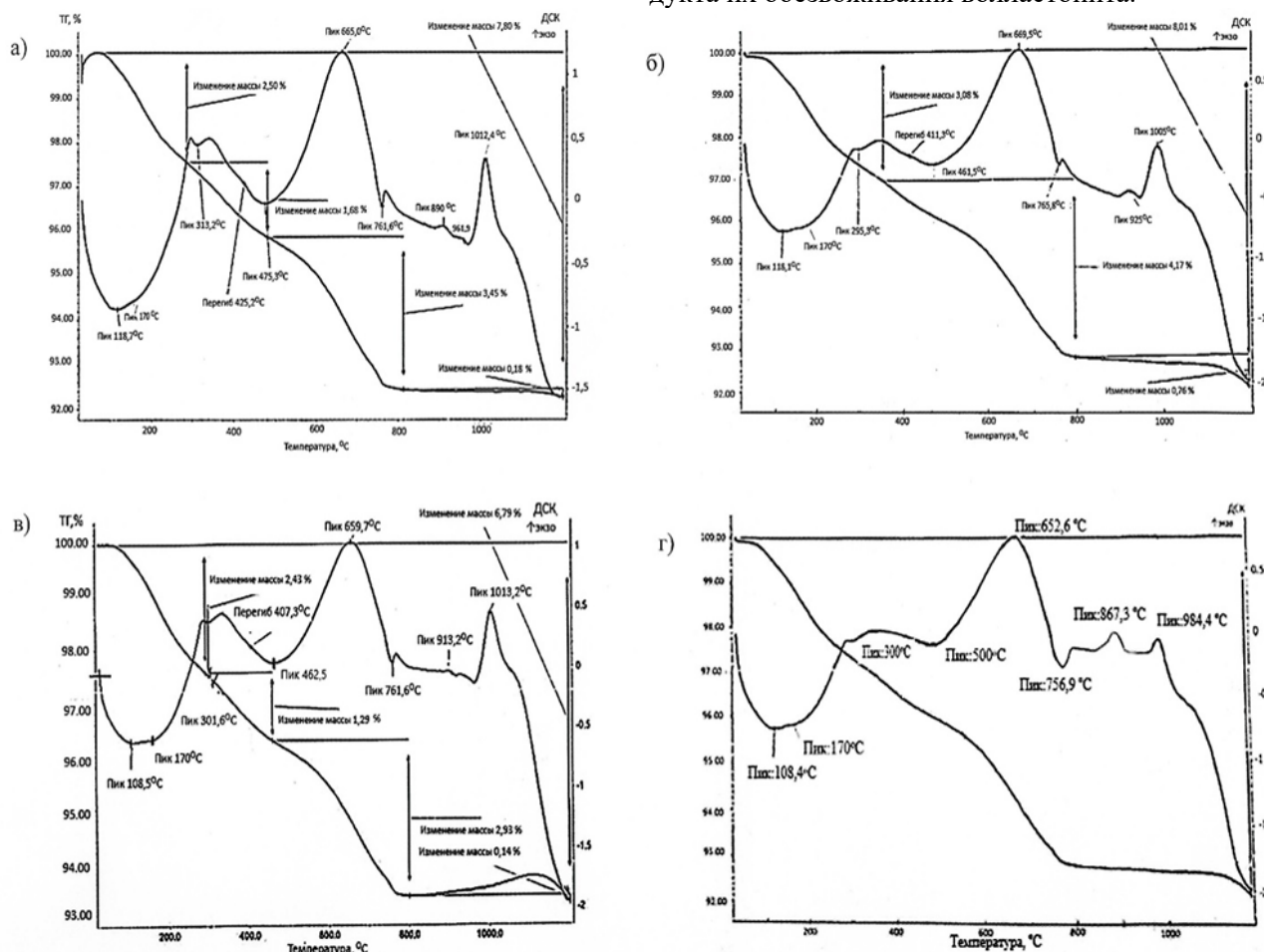


Рис. 2. Результаты дифференциально-термического анализа ЗЦК после тепловлажностной обработки, содержащего минеральные добавки:

а – без добавки; б – отсев дробления горнблендита; в – шлак медеплавильный гранулированный; г – шлак доменный гранулированный

Незначительный эндоэффект на дериватограмме ЗЦК с максимумом при 313,2 °C характеризует дальнейшее обезвоживание тоберморитового геля. Так в процессе дегидратации в данной температурной области может удалиться до 1,5 молекулы воды [13, 15]. Дальнейшее увеличение температуры термообработки сопровождается появлением незначительного экзотермического эффекта при 425,2 °C, обусловленного окислением магнетита до гематита, содержащимся в золе. Эндотермический эффект при температуре 475,3 °C указывает на дегидратацию портландита, а значительный экзотермический эффект с максимумом при 665 °C связан с выгоранием коксовых остатков золы. Эндоэф-

фект при температуре 761,6 °C указывает на завершающий этап ступенчатой дегидратации высокоосновного гидросиликата кальция тоберморита, которая завершается кристаллизацией продукта его обезвоживания двухкальциевого силиката, что подтверждается небольшим экзотермическим эффектом с максимумом при температуре 961,9 °C. Экзотермический эффект при 890 °C связан с кристаллизацией волластонита – продукта обезвоживания низкоосновного гидросиликата кальция состава CSH(B). Последующее увеличение температуры ЗЦК способствует взаимодействию аморфных оксидов CaO , SiO_2 и Al_2O_3 , являющихся продуктами разложения гидросульфатно-

минатов и гидросиликатов кальция, с образованием анортита $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, что подтверждается значительным экзоэффектом с максимумом при 1012,4 °С [16]. Таким образом, установлено, что твердение ЗЦК при тепловлажностной обработки, содержащего золу-уноса Рефтинской ГРЭС и портландцемент, сопровождается образованием этtringита, тоберморитового геля, портландита и тоберморита, а также низкоосновного гидросиликата кальция состава CSH(B) , который образуется в результате взаимодействия алюмосиликатного стекла и кварца золы с портландитом.

Исследования показали, что при введении минеральных добавок состав продуктов гидратации ЗЦК в основном не меняется, но отличается в сторону снижения его основности и увеличения количества низкоосновных гидросиликатов кальция. Так на дериватограмме ЗЦК с добавкой отсева дробления горнблендита в области температуры от 100 до 760 °С присутствуют тепловые эффекты, близкие к бездобавочному ЗЦК, и обнаружены новые эндоэффекты при более высокой температуре (рис. 2, б). В температурной области 800–1000 °С на дифференциальной кривой присутствует один экзотермический эффект с максимумом при температуре 925 °С, подтверждающий кристаллизацию волластонита – продукта обезвоживания низкоосновного гидросиликата кальция CSH(B) , тогда как в бездобавочном ЗЦК наблюдаются два экзоэффекта при 890,0 и 961,9 °С. При введении отсева дробления горнблендита исчезновение в ЗЦК экзоэффекта с максимумом при 890 °С, связанного с разложением высокоосновного гидросиликата кальция тоберморита, и смещение температуры кристаллизации волластонита в область более низких температур может быть обусловлено уменьшением основности низкоосновного гидросиликата кальция состава CSH(B) [13, 14].

Минеральный состав отсева дробления горнблендита представлен в основном роговой обманкой, шамозитом и анортитом. Анортит в нейтральной водной среде практически не гидратирует, но с повышением ее щелочности и температуры до 90–95 °С его гидратация ускоряется. Таким образом, образование дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(B) в пропаренном ЗЦК, содержащем отсев дробления горнблендита, может быть обусловлено взаимодействием анортита горнблендита с портландитом цементного камня [17].

При введении медеплавильного шлака характер дериватограммы ЗЦК в области температуры от 100 до 760 °С существенно не отличается от кривых нагревания искусственного камня без и с добавкой отсева дробления горнблендита, они

имеют близкие тепловые эффекты (рис. 2, в). Однако на кривых ЗЦК в температурной области 800–1000 °С они различаются величиной экзотермических эффектов. На дериватограмме ЗЦК с добавкой медеплавильного шлака присутствует едва заметный экзоэффект с максимумом при температуре 913 °С, связанный с кристаллизацией волластонита, образующимся при обезвоживании низкоосновного гидросиликата кальция CSH(B) . Таким образом, показано, что добавка медеплавильного шлака не способствует образованию в ЗЦК дополнительного количества новых гидратных фаз, так как содержащиеся в нем не активные фазы не гидратируют и не вступают в реакцию с продуктами гидратации портландцемента. Поэтому повышение его прочности может быть обусловлено уплотнением структуры ЗЦК при введении данной добавки.

Особенностью твердения ЗЦК с добавкой доменного гранулированного шлака по сравнению с бездобавочным камнем является то, что, наряду с гидратацией клинкерных минералов цемента, происходит также их взаимодействие с продуктами гидратации стеклофазы и минералов доменного шлака (рис. 2, г). На дериватограмме ЗЦК с доменным шлаком эндотермический эффект с максимумом при температуре 108,5 °С обусловлен удалением гидратной воды из гидросульфоалюминатов кальция, а эндоэффект при 170 °С связан с частичным обезвоживанием тоберморитового геля и дегидратацией гидросиликатов кальция состава CSH(B) . При дальнейшем нагревании в области температуры 400–500 °С наблюдается снижение интенсивности эндоэффекта, характеризующего дегидратацию портландита, по сравнению с ЗЦК, содержащим отсев дробления горнблендита и медеплавильный шлак, что является подтверждением взаимодействия химически активной шлаковой составляющей с Ca(OH)_2 и увеличения количества гидросиликатов CSH(B) [13].

По данным [17] при твердении в нормальных условиях доменные шлаки не взаимодействуют с водой, но в присутствии портландита, выделяющегося при гидролизе алита цемента, и, особенно, с увеличением температуры твердения, гидравлическая активность их значительно повышается и образуются гидросиликаты кальция состава CSH(B) и C_2SH_2 . Так при температуре твердения, равной 60 °С, в цементношлаковом камне присутствуют гидросиликаты кальция состава $\text{C}_2\text{SH(C)}$, а при его пропаривании при 100 °С – гидросиликаты кальция типа CSH(B) . Состав возможных новообразований, образующихся при гидратации доменного гранулированного шлака в присутствии портландцемента, достаточно подробно изучен в работах [13, 16, 17].

Так при взаимодействии мелилита с известью образуются только гидрогранаты, а гидратация стекла мелилитового состава в условиях гидротермальной обработки сопровождается формированием гидрогеленита. В тоже время совместная гидратация стекловидного и кристаллического мелилита в присутствии портландита при гидротермальной обработке приводит к образованию гидрогранатов и гидросиликатов кальция состава $C_2SH(A)$ и $CSH(B)$. Таким образом, в зависимости от минерального состава доменного шлака продукты гидратации в присутствии цемента могут различаться. Так, гранулированный шлак, содержащий до 90 % стекловидной фазы, в отличие от медленно охлажденного (закристаллизованного) при тепловлажностной обработке гидратируется более энергично с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция.

На кривой дифференциально-термического анализа ЗЦК с добавкой доменного шлака в области высоких температур 800–1000 °С имеются два экзоэффекта. Первый экзоэффект при температуре 867,3 °С связан с образованием волластонита в результате полного обезвоживания гидросиликата кальция состава $CSH(B)$, а второй экзоэффект при 984,4 °С – с кристаллизацией шлакового стекла мелилитового состава [16]. Также установлено, что при введении шлака доменного гранулированного основность образующихся гидросиликатов кальция в ЗЦК понижается, что подтверждается снижением температурных максимумов их экзоэффектов. Так на дериватограмме ЗЦК с доменным шлаком по сравнению с бездобавочным камнем экзоэффект, характерный для гидросиликатов кальция состава $CSH(B)$, смещение с 890 до 867,3 °С. Согласно [1, 13] при снижении основности гидросиликатов кальция до 1,3 и менее на дериватограмме появляется экзотермический эффект с максимумом в интервале температур 800–900 °С, являющийся главным диагностическим признаком для гидросиликата кальция состава $CSH(B)$.

Выводы.

1. Изучены химико-минеральный состав и свойства техногенных отходов, вводимых в качестве минеральной добавки в состав ЗЦК. Установлено, что с увеличением коэффициента качества их гидравлическая активность повышается в ряду: шлак медеплавильный → отсев дробления горнблендита → шлак доменный гранулированный. Добавка доменного шлака с K , равным 1,49, увеличивает прочность ЗЦК в 2,7 раза, отсева дробления горнблендита с $K=0,94$ – в 2,05 раза, шлака медеплавильного с $K=0,27$ – на 47,7 %. Наибольшую прочность на сжатие после теп-

ловлажностной обработки имеет ЗЦК, содержащий 20 % добавки шлака доменного гранулированного или отсева дробления горнблендита от массы золы-уноса.

2. Увеличение прочности на сжатие ЗЦК с добавкой доменного гранулированного шлака или отсева дробления горнблендита обусловлено образованием дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция состава $CSH(B)$ в результате взаимодействия химически активных составляющих минеральных добавок с портландитом цементного камня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Мордовцева М.В. Молотый гранулированный доменный шлак – средство повышения эффективности и долговечности бетонов // Цемент и его применение. 2023. № 2. С. 62–69.
2. Уфимцев В.М., Григорьева В.Ф. Бесцементный бетон на высококальциевой золе ТЭС // Технологии бетонов. 2019. № 9-10. С. 158–159.
3. Овчаренко Г.И. Золой углей КАТЭКа в строительных материалах. Красноярск: КГТУ, 1992. 216 с.
4. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А., Лейцин В.Н. Зола-уноса при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей // Строительство и реконструкция. 2023. №5. С. 132–147.
5. Иванов И.А. Легкие бетоны с применением зол электростанций. М.: Стройиздат, 1986. 136 с.
6. Ярмаковский В.Н. Физико-химические и структурно-технологические основы получения высокопрочных и высокодолговечных конструкционных легких бетонов // Строительные материалы. 2016. № 6. С. 6–11.
7. Смоляков А.В. Эффективность в цементе и цементном бетоне диспергированной гранитной породы // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 4. С. 297–305.
8. Демьянова В.С., Калашников В.И., Казина Г.Н. Дисперсно-наполненные клинкерные цементы на основе отходов камнедробления // Известия вузов. Строительство. 2006. № 5. С. 30–36.
9. Ильина Л.В., Молодин В.В., Гичко Н.О., Туляганов А.К. Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия // Строительные материалы. 2023. № 7. С. 36–42.
10. Семериков И.С., Гаврилюк М.Н., Устьянцев В.М. Взаимодействие горнблендита, гранодиорита и фельзита, как легкоплавких горных пород среднего Урала, с известью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №1. С. 157–159.

11. Капустин Ф.Л., Рагозин Д.В., Кузнецов И.С., Семериков И.С., Капустин А.Ф. Влияние доменного шлака на качество цемента по ГОСТ 31108-2003 // Вестник Ю-УрГУ. 2010. Вып. 10. С. 22–24.

12. Капустин Ф.Л., Афанасьева М.А. Использование медеплавильного шлака в производстве цементов общестроительного назначения // Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2013. № 3 (30). С. 52–58.

13. Тейлор Х. Химия цемента / пер. с англ. А. И. Бойковой, Т. В. Кузнецовой. М.: Мир, 1996. 560 с.

14. Рамачандран В.С. Применение дифференциального термического анализа в химии цементов М.: Стройиздат, 1977. 408 с.

15. Ларионова З.М., Ларионова З.М., Никитина Л.В., Гарагин В.Р. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона. М.: Стройиздат, 1977. 262 с.

16. Горшков В.С., Александров С.Е., Иващенко С.И., Горшкова И.В. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве. М.: Стройиздат, 1985. 272 с.

17. Бернацкий А.Ф. Электроизоляционный бетон (технология, свойства, конструкции). Новосибирск: НГУАДИ, 2016. 184 с.

Информация об авторах

Фомина Ирина Викторовна, старший преподаватель кафедры материаловедения в строительстве. E-mail: irina.fomina@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Капустин Фёдор Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения в строительстве. E-mail: f.l.kapustin@urfu.ru. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Поступила 29.04.2024 г.

© Фомина И.В., Капустин Ф.Л., 2024

**Fomina I.V., Kapustin F.L.*

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

**E-mail: irina.fomina@urfu.ru*

INFLUENCE OF MINERAL ADDITION ON THE HYDRATION AND THE HARDENING OF ASH-CEMENT STONE DURING HEAT AND STEAM CURING

Abstract. The influence of mineral additives, introduced in an amount of 20% to replace part of the fly ash, on the composition of hydration products and hardening of ash-cement stone after heat and steam curing was studied. The greatest increase in the compressive strength of ash-cement stone is provided by the use of ground granulated blast furnace slag and crushed hornblendite screenings, the introduction of which increases it by 2 times compared to non-additive stone. Differential thermal analysis of ash-cement stone has established that in the presence of blast furnace slag, the basicity of low-basic calcium hydrosilicates of composition CSH(B) decreases, and their amount increases as a result of the binding of portlandite with the active components of the additive and aluminosilicate glass of fly ash. The increased content of low-basic calcium hydrosilicates helps to increase the compressive strength of ash-cement stone. The addition of crushed hornblendite screenings does not change the composition of hydrate formations, and the increase in its strength is due to the high density and strength of rock particles. The introduction of copper smelting slag instead of part of the ash does not contribute to an increase in the content of new hydrate formations in the ash-cement stone, since its components do not interact with the hydration products of portland cement, and the lack of hydraulic activity is due to the low content of calcium and aluminum oxides in it, the presence of a significant amount of chemically inert fayalite and glass phase. The experimental results obtained make it possible to evaluate the effectiveness of the influence of mineral additives on the strength characteristics of ash-cement stone in order to increase the volume and rational use of fly ash from thermal power station as part of composite materials, in the production of foamed aggregate, for example, non-fired fly ash gravel.

Keywords: fly ash, mineral additive, ash-cement stone, hydration, strength.

REFERENCES

1. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Mordovtseva M.V. Ground granulated blast furnace slag – measures for measuring the efficiency and stability

of concrete [Molotyy granulirovanny domennyy shlak – sredstvo povysheniya effektivnosti i dolgovechnosti betonov]. Cement and its application. 2023. No. 2. Pp. 62–63. (rus)

2. Ufimtsev V.M., Grigoryeva V.F. Cement-free concrete based on high-calcium ash from thermal power station [Bestsementnyy beton na vysokokaltsievoy zole TES]. Concrete technology. 2019. No. 9-10. Pp. 158–159. (rus)
3. Ovcharenko G.I. Coal ash from the Kansk-Achinsk deposit in construction materials [Zolyugley KATEKa v stroitelnykh materialakh]. Krasnoyarsk: KGTU, 1992. 216 p. (rus)
4. Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov A.A., Leytsin V.N. Fly ash in the production of concrete for various applications and dry building mixes [Zola-unosa pri proizvodstve betonov razlichnogo naznacheniya i sukhikh stroitelnykh smesey]. Building and Reconstruction. 2023. No. 5. Pp. 132–147. (rus)
5. Ivanov I.A. Lightweight concrete using thermal power station ash [Legkie betony s primeneniem zol elektrostantsiy]. M.: Stroyizdat, 1986. 136 p. (rus)
6. Yarmakovskiy V.N. Physico-chemical and structural-technological basis for the production of high-strength and highly durable structural lightweight concrete [Fiziko-khimicheskie i strukturno-tekhnologicheskie osnovy polucheniya vysokoprechnykh i vysokodolgovechnykh konstruksionnykh legkikh betonov]. Construction Materials. 2016. No. 6. Pp. 6–11. (rus)
7. Smolyakov A.V. Effectiveness in cement and cement concrete of dispersed granite rock [Effektivnost v tsemente i tsementnom betone dispergirovannoy granitnoy porody]. Science and technology. 2018. Vol. 17. No. 4. Pp. 297–305. (rus)
8. Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Kazina G.N. Disperse-filled clinker cements based on stone crushing waste [Dispersno-napolnennyye klinkernyye tsementy na osnove otkhodov kamnedrobleniya]. News from universities. Construction. 2006. No. 5. Pp. 30–36. (rus)
9. Ilina L.V., Molodin V.V., Gichko N.O., Tulyaganov A.K. Increasing the strength characteristics of cement conglomerates using directed additives [Povyshenie prochnostnykh kharakteristik tsementnykh konglomeratov dobavkami napravlennogo deystviya]. Construction Materials. 2023. No. 7. Pp. 36–42. (rus)
10. Semerikov I.S., Gavriluk M.N., Ustyantsev V.M. Interaction of hornblendite, granodiorite and felsite, as fusible rocks of the Middle Urals, with lime [Vzaimodeystvie gornblendita, granodiorita i felzita, kak legkoplavkikh gornykh porod srednego Urala, s izvestyu]. Bulletin of BSTU named after VG Shukhov. 2014. No. 1. Pp. 157–159. (rus)
11. Kapustin F.L., Ragozin D.V., Kuznetsov I.S., Semerikov I.S., Kapustin A.F. The influence of blast furnace slag on the quality of cement according to GOST 31108-2003 [Vliyanie domennogo shlaka na kachestvo tsementa po GOST 31108-2003]. Bulletin of South Ural State University. 2010. Issue. 10. Pp. 22–24. (rus)
12. Kapustin F.L., Afanasyeva M.A. Use of copper smelting slag in the production of cements for general construction purposes [Ispolzovanie medeplavilnogo shlaka v proizvodstve tsementov obshchestvoitelnogo naznacheniya]. Cement. Concrete. Dry mixes. 2013. No. 3 (30). Pp. 52–58. (rus)
13. Teylor Kh. Chemistry of cement. Per. s angl. A. I. Boykovoy, T. V. Kuznetsovoy. M.: Mir, 1996. 560 p. (rus)
14. Ramachandran V.S. Application of differential thermal analysis in cement chemistry [Primenenie differentsialnogo termicheskogo analiza v khimii tsementov]. M.: Stroyizdat, 1977. 408 p. (rus)
15. Larionova Z.M., Larionova Z.M., Nikitina L.V., Garashin V.R. Phase composition, microstructure and strength of cement stone and concrete [Fazovyy sostav, mikrostruktura i prochnost tsementnogo kamnya i betona]. M.: Stroyizdat, 1977. 262 p. (rus)
16. Gorshkov V.S., Aleksandrov S.E., Ivashchenko S.I., Gorshkova I.V. Complex processing and use of metallurgical slag in construction [Kompleksnaya pererabotka i ispolzovanie metallurgicheskikh shlakov v stroitelstve]. M.: Stroyizdat, 1985. 272 p. (rus)
17. Bernatskiy A.F. Electrical insulating concrete (technology, properties, structures) [Elektroizolyatsionnyy beton (tekhnologiya, svoystva, konstruksii)]. Novosibirsk: NGUADI, 2016. 184 p. (rus)

Information about the authors

Fomina, Irina V. Senior lecturer at the Department of Materials Science in construction. E-mail: irina.fomina@urfu.ru. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

Kapustin, Fedor L. Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Materials science in construction. E-mail: f.l.kapustin@urfu.ru. Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin. Russia, 620002, Ekaterinburg, st. Mira, 19.

Received 29.04.2024

Для цитирования:

Фомина И.В., Капустин Ф.Л. Влияние минеральной добавки на гидратацию и твердение золоцементного камня в условиях тепловлажностной обработки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 88–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-88-97

For citation:

Fomina I.V., Kapustin F.L. Influence of mineral addition on the hydration and the hardening of ash-cement stone during heat and steam curing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 88–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-88-97

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110

Севостьянов М.В., Агеева М.С., Севостьянов В.С., Фомина Е.В., *Проценко А.М.,
Бабуков В.А., Шамгулов Р.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: nastyal2rudchenko8@gmail.com

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ СМЕСЕЙ С ТЕХНОГЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Аннотация. В статье рассмотрена целесообразность комплексной переработки техногенных материалов. Изучены возможности получения строительных материалов из вторичных материальных ресурсов, таких как отходы производства базальтовых волокнистых утеплителей, получения технического углерода из резинотехнических отходов методом термолизной технологии. Представлены патентозащищенные ресурсо-энергосберегающие машины и агрегаты для комплексной переработки техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками. Обосновано выделение спёка («королька») как отдельного вида полуфабриката с дальнейшей его механоактивацией. Получение волокон различной длины, сферического гранулята из вторичных базальтовых волокнистых отходов, агломерированного технического углерода. Изучена необходимость гомогенизации композиционных смесей в рециркуляционном смесителе комбинированного действия. Представлен технологический комплекс для получения сухих строительных смесей с различными компонентами. С использованием многофакторного планирования эксперимента исследованы физико-механические характеристики и физико-химические свойства композиционных смесей. В результате проведенных исследований установлены рациональные составы композиционных смесей. При изготовлении бетонных изделий из гомогенизированной цементно-песчанной композиционной смеси ($B/C=0,2$) с добавками технического углерода (5 %) и механоактивированных «корольков» – спеков $S_{уд}=800 \text{ м}^2/\text{кг}$ – 6 % от массового содержания вяжущего; механическая прочность образцов – $\sigma_{сж,28} = 57 \text{ МПа}$ на 26 % превышает прочность стандартных образцов ($\sigma_{сж,ст.28} = 45 \text{ МПа}$).

Ключевые слова: ресурсосбережение, техногенные материалы, спёк («корольк»), механоактивация, технический углерод, смешение, композиционные материалы, агломерирование, технологическая линия.

Введение. В настоящее время одной из проблемных задач в области экологической безопасности и природообустройства является образование и накопление отходов производств и жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) в виде техногенных материалов (ТМ). При этом важнейшей задачей является разработка технологий и технических средств для их комплексной переработки, а также получения на их основе востребованной продукции. В технологической цепи комплексной переработки ТМ особое место занимают процессы механо-термической обработки ТМ: дезагломерации техногенных волокнистых материалов (базальтовых отходов, целлюлозно-бумажных отходов (ЦБО) и др.), агломерирования полидисперсных материалов, в частности технического углерода (ТУ) низкотемпературной термолизной технологии, получения из них фибронаполнителей; а также получения широкой гаммы композиционных смесей с техногенными гетерогенными компонентами [1–5]. Все это предопределяет необходимость разработки технологии комплексной переработки и

создания специального оборудования с учетом их специфических свойств.

Материалы и методы. При проведении исследований был использован план полного факторного эксперимента ЦКРП-2³. Уровни варьирования факторов (x_1, x_2, x_3) следующие: содержание технического углерода (x_1) – ($4 \div 12$ %), содержание минеральной добавки (x_2) – ($1,5 \div 8,5$ %), водоцементное отношение – B/C отношение (x_3) – ($0,2 \div 0,4$).

В качестве минеральной добавки были использованы тонкомолотые спёк («корольки») ($S_{уд} = 800 \text{ м}^2/\text{кг}$). Критериями качества сформованных образцов принята механическая прочность образцов размерами $(2 \times 2 \times 2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ на сжатие ($R_{сж,28}$) в возрасте 28 суток.

При водоцементном отношении равном 0,4 и 0,3 отмечается шероховатая поверхность образцов (рис. 1, а, б). При избытке воды происходит расслоение сырьевой смеси, а так как плотность частиц ТУ ($\rho = 300\text{--}400 \text{ кг}/\text{м}^3$) ниже плотности воды, то они всплывали на поверхность, придавая текстурную шероховатость [6,7].

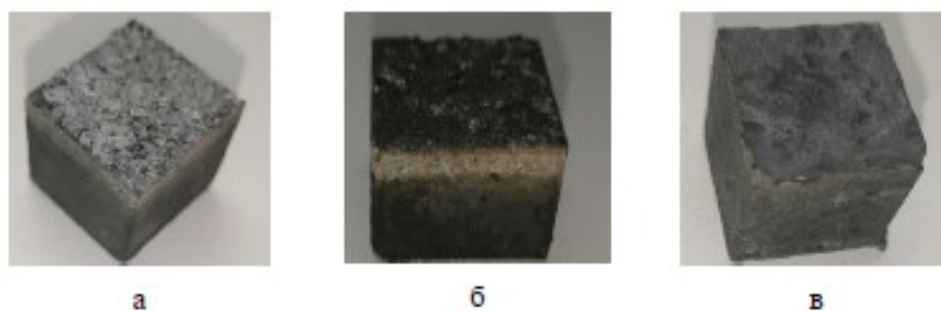


Рис. 1. Внешний вид образцов при различном В/Ц:
а – В/Ц = 0,4; б – В/Ц = 0,3; в – В/Ц = 0,2

При В/Ц = 0,2 вязкость системы повышается и ТУ остается в цементной матрице, о чем свидетельствует однородная структура и текстура образца по всем граням кубика (рис. 1, в).

Основная часть. Проведенные многолетние научно-технические разработки, теоретические и экспериментальные исследования реализуют в производственных условиях ряд инновационных ресурсо-энергосберегающих технологий и патентозащищенного оборудования: низкотемпературной термолизной технологии переработки органических техногенных материалов, в частности органосодержащих твердых коммунальных отходов (ТКО), теплоэнергосберегающих технологий компактирования ТМ с различными физико-механическими характеристиками (брикетирования древесных и полимерсодержащих отходов; экструдирования целлюлозно-бумажных отходов (ЦБО), полимерных отходов и др.) [8].

Возросшие требования по энергоэффективности современных зданий приводят к более широкому использованию при строительстве теплоизоляционных материалов, среди которых особо выделяется минеральная вата. Повышение объемов ее производства, соответственно, приводит к увеличению ее отходов. По прогнозам ученых и производителей, объем отходов минеральной ваты к 2030 году вырастет до 2,82 миллиона тонн. Общий термин минерального волокна включает каменную вату (КВ), базальтовые волокнистые утеплители, стекловату (СВ) и др. [9].

В зависимости от заданных параметров и технологических условий процесса получения теплоизоляционных материалов, образуются волокна различной длины и диаметра, а также некоторая доля оплавленных сферических частиц, называемых спёками («корольками»).

В научной литературе известны различные подходы для реализации рациональных способов переработки отходов минеральной ваты. Среди них отмечается эффективность использования спёка («корольков»). Однако, не решена проблема отделения корольков от общей массы волокон, а, в отдельных случаях, используется не

механизированная классификация продуктов разделения, что невозможно в производственных масштабах. Между тем, в тонкоизмельченном виде «корольки» обладают вяжущими свойствами при условии щелочной или механоактивации и получении шлакощелочного вяжущего для бетонных смесей [10–12]. В исходном состоянии «корольки» представляют собой сыпучий, грубодисперсный материал (размером свыше 0,25 мм), в котором практически отсутствует пылевидная фракция. Наличие аморфных силикатных фаз в этом материале позволяет использовать его в качестве эффективной активной минеральной добавки в цементобетоны естественного и автоклавного твердения.

Для решения данной комплексной задачи – дезагломерации базальтовых крупнокусковых конгломератов, измельчения и гомогенизации фибр, формования сферических гранул из них - с использованием выполненных ранее научно-технических разработок, был разработан вибро-центробежный агрегат комбинированного действия «Устройство и способ переработки волокнистых техногенных материалов для получения фибронаполнителей (варианты)» [13] (рис. 2).

С целью расширения технологических возможностей агрегата – получения волокон различной длины, выведения спёка («королька») и неметаллических включений из отходов производства базальтовой ваты, был разработан «Вибрационно-центробежный агрегат для классификации техногенных волокнистых материалов» [14] (рис. 3).

На разных стадиях (в разных камерах) агрегат выполняет различные технологические задачи. Так, верхняя призматическая камера предназначена для дезагломерации конгломерированного исходного ТВМ различной геометрической формы и размеров с помощью подпружиненных гирлянд цепных завес. В нижней части камеры с помощью ромбовидного классификатора (рис 3, а, поз 1) происходит предварительный рассев базальтовых волокнистых отходов (БВО). Средняя цилиндрическая камера, в зави-

симости от поставленной технологической задачи, может быть использована как измельчитель, гомогенизатор (рис. 2, а, поз. 2) или классификатор (рис. 3, а, поз. 2). В ней происходит удаление спёка («королька») из основной массы волокон для дальнейшего использования. Нижняя цилиндрическая камера может быть использована как измельчитель (получение измельченных фибр) (рис. 2, а, поз. 3) или гранулятор (окачиватель) (рис. 3, а, поз. 3) – получение сферических

микрофибронеполнителей из БВО (рис. 4). Полученные из БВО компоненты: фибронеполнители различных размеров, исходные (после классификации) или механоактивированные «корольки», сферические микрофибронеполнители ($d_{\text{ср.гр.}}=4-6$ мм), использовались для получения композиционных смесей различных составов и изделий из них.

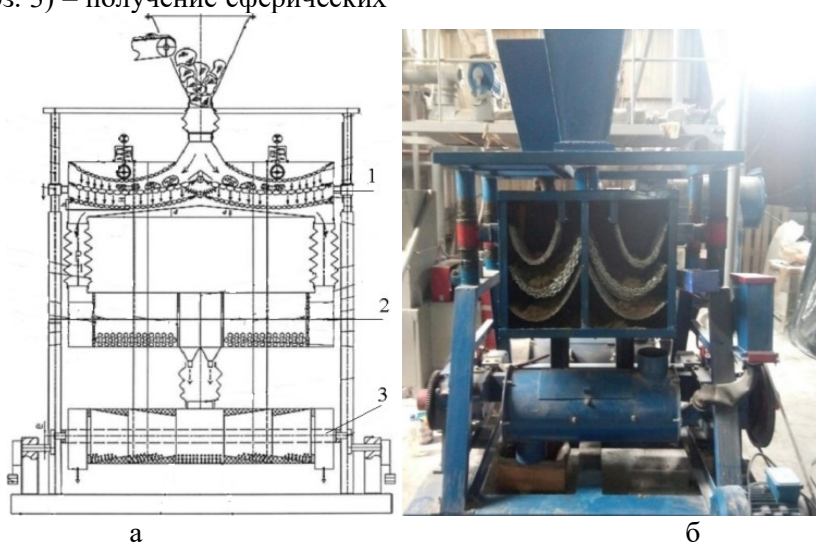
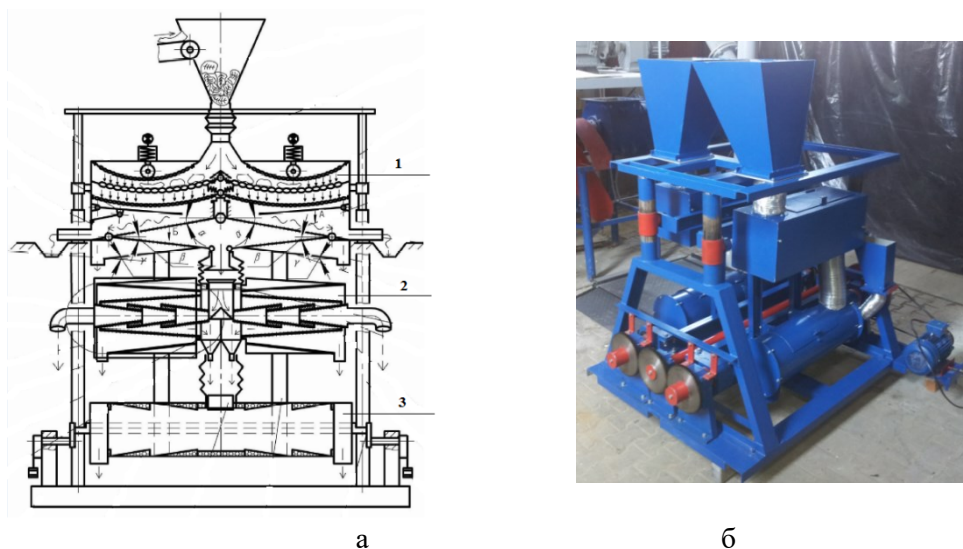


Рис. 2. Вибро-центробежный агрегат комбинированного действия
а – структурная схема; б – общий вид опытно-промышленного агрегата



Рису. 3. Вибрационно-центробежный агрегат для классификации техногенных волокнистых материалов:
а – структурная схема; б – общий вид действующего агрегата



Рис. 4. Сферические микрофибронеполнители из БВО

При разработке «интеллектуальных» строительных материалов используются комбинированные добавки на основе технического углерода низкотемпературной термолизной технологии (ТУ) при сочетании различных углеродных форм (полиморфные модификации, линейные размеры, дисперсность) [15]. Установлено, что частицы ТУ не участвуют в гидратации цемента, а их высокая удельная поверхность позволяет эффективно заполнять поры на микро- и нано-уровне бетона. При этом появляется возможность контролирования распространения микро-трещин в цементных композитных материалах. Действуя как инертный наполнитель, ТУ проявляет себя в качестве эффективного способа регулирования свойств бетона. Например, уменьшения усадочной деформации, снижения проницаемости и тем самым – повышения долговечности бетона [16, 17].

Получаемый по низкотемпературной термолизной технологии технический углерод является полидисперсным пылевидным материалом с низкой насыпной плотностью. Использование его без дополнительной обработки затруднено. В этой связи для расширения технологических возможностей применения ТУ его целесообразно агломерировать. Однако специфические особенности ТУ (низкая насыпная плотность, низкая сыпучесть, полидисперсность, повышенное пыление при транспортировании и др.) не позволяют использовать существующее оборудование и технологии для агломерирования данного востребованного продукта [18].

Для расширения области использования ТУ разработана патентозащищенная конструкция барабанно-винтового агрегата (рис. 5) [19].

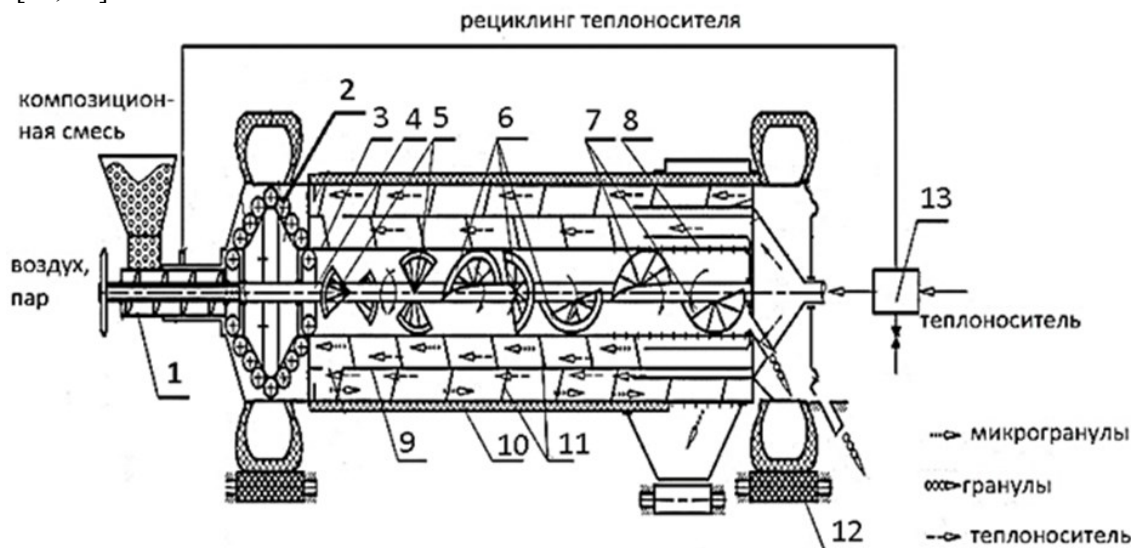


Рис. 5. Барабанно-винтовой агрегат для агломерирования технического углерода низкотемпературной термолизной технологии:

1 – загрузочное устройство; 2 – спиралевидный блок микрогрануляции; 3 – центральный барабан; 4 – транспортирующий орган; 5 – двухзаходные геликоидальные лопасти; 6 – однонаправленные в сторону выгрузки однозаходные винтовые лопасти; 7 – однозаходные разнонаправленные винтовые лопасти; 8 – сетчатая поверхность; 9 – средний барабан; 10 – внешний теплоизолированный барабан; 11 – нормальные полые геликоидальные параллелепипеды-геликоиды; 12 – опорные ролики; 13 – распределительный блок рециркуляции теплоносителя

Исходный ТУ, предварительно гомогенизируемый со связующим в смесителе, поступает в загрузочное устройство 1, откуда транспортирующим шнеком подается в спиралевидный блок микрогрануляции 2. Последний выполнен в виде усечённых конусов с закреплённой на их поверхности трубой в виде спирали. В спиралевидном блоке происходит образование микрозродышей вследствие интенсивного передвижения материала, который находится в трубчатом контуре. Пройдя трубчатый контур, шихта попадает в центральный барабан 3, где происходит рециклинга микрогранулята. По центральному

барабану шихта продвигается с помощью транспортирующего органа 4, где за счёт попарно установленных на центральном валу разнонаправленных двухзаходных геликоидальных лопастей 5, осуществляется интенсивное перемешивание, способствующее гранулообразованию. Далее с помощью однонаправленных в сторону выгрузки винтовых лопастей 6, установленных последовательно, материал направляется на классификацию гранулята однозаходными разнонаправленными винтовыми лопастями 7 на сетчатой поверхности 8. Образующая просыпь попадает в средний барабан 9. Из распределительного блока рециркуляции теплоносителя 13 теплоноситель поступает в теплоизолированный барабан 10, а затем в опорные ролики 12.

тельного блока теплоносителя 13, через конусообразный раструб в средний барабан подаётся теплоноситель. В среднем барабане просыпь подвергается сушке и направляется в прямотоке с теплоносителем к выгрузочной части. В процессе движения на просыпь воздействуют нормальные полые геликоидальные параллелепипеды-геликоиды 11. Просыпь попадает во внешний теплоизолированный барабан 10, установленный на опорных роликах 12. Во внешнем барабане происходит окончательный процесс сушки материала, по завершении которого просыпь движется в противотоке с теплоносителем на выгрузку.

Основными, отличительными от существующих конструкций, особенностями являются: процесс микрогранулирования в спиралевидном блоке, рециркуляционное воздействие ДВЛ при упрочнении микрогранул, окончательное гранулообразование с помощью ОВЛ, постадийная классификация агломерированного материала. Кроме того, при использовании данного агрегата значительно повышается качество сушки материала за счет циркуляции теплоносителя и наличия двух барабанов. В таблице 1 представлены физико-механические характеристики гранулированного ТУ.

Таблица 1

Физико-механические характеристики гранулированного ТУ

Наименование показателя	Значение
Вид связующего	Водный раствор ПАВ
Содержание связующего	18–20 %
Фракционный состав гранулята:	
≥ 5 мм;	8–9 %
4–5 мм;	4–5 %
3–4 мм;	5–6 %
2–3 мм;	65–70 %
≤ 2 мм;	18–20 %
Насыпная плотность	600–700 кг/м ³
Угол естественного откоса – $f_{гр}$	0,48
Угол динамического откоса – $f_{дин.гр}$	0,35

Дальнейшая технологическая операция получения композиционных смесей с использованием компонентов ТМ реализуется на стадии их гомогенизации.

В настоящее время для различных видов композиционных смесей используются определенные типы смесителей, которые наиболее эффективны для данных технологических процессов. При этом, эффективность процесса смешивания компонентов во многом зависит от их физико-механических характеристик (геометрической формы и гранулометрии частиц, их плотности, влагоемкости, адсорбционной способности и др.), а также от конструктивно-технологических параметров и технологических условий гомогенизации композиционных смесей (соотношения компонентов; коэффициента загрузки смесителя; скоростных параметров рабочих органов, их геометрии и формы, схемы взаимного расположения; вида связующих, условий гомогенизации и др.).

В связи с тем, что вышеперечисленные компоненты ТМ (различные волокна, фиброполнители, технический углерод, механоактивированный «королек» и др.) имеют различные физико-механические характеристики и физико-химические свойства, то затрудняется получение

однородных композиционных смесей заданного состава.

Наиболее универсальными являются смесители с комбинированными рабочими органами, а также реализацией в них постадийного процесса гомогенизации с осуществлением внутреннего рециклинга материала.

В рамках выполнения национального проекта «Наука и университеты» новой лабораторией под руководством молодых исследователей «Ресурсо-энергосберегающие технологии, оборудование и комплексы» был разработан состав строительной смеси [20], состоящий из технического углерода, минеральной добавки и других компонентов.

Проблемной задачей является получение однородной (гомогенной) сырьевой смеси при наличии в ее составе волокнистых отходов (фибронеполнителей). Как отмечалось выше, для изменения физических характеристик ТБМ: насыпной плотности, геометрических размеров волокон, их сыпучести и др. показателей необходимо постадийное воздействие на материал – дезагломерация, классификация, измельчение и получение сферических гранул. Ввод последних в композиционную шихту улучшает процесс рас-

пределения волокон при гомогенизации строительной смеси, обеспечивает ее прочность ($\sigma_{сж}$) и трещиностойкость [21].

С учетом проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований, конструкторско-технологических разработок и апробации патентозащищенных агрегатов нами разработана, изготовлена и испытана технологическая линия (рис. 6) для получения композиционных смесей с использованием компонентов, полученных из ТМ. Технологические процессы реализуются следующим образом. В бункерах 1 – 3 содержатся вяжущие материалы (например, цемент), исходный полифракционный песок и предварительно механоактивированный кремнеземистый компонент (например – отклассифицированный из ТВМ «королек»). С помощью питателей 4 компоненты подаются в общий транспортирующий шнек 5, оснащенный мотор-редуктором 6. Далее исходные материалы поступают в камеру макросмешивания 7 рециркуляционного смесителя комбинированного действия [22]. В результате работы однаходовых винтовых устройств в данной камере осуществляется интенсивное перемешивание основных компонентов. Затем, предварительно перемешанная смесь,

поступает в камеры микросмешивания 8 и гомогенизации добавок 9. В камеру 9 через патрубок 12 добавки из бункеров 10, 11 подаются с помощью дозаторов 4. За счет воздействия двухходовых винтовых устройств осуществляется четырехкратное интенсивное воздействие и внутренний рециклинг компонентов за один оборот вала. После этого готовые материалы поступают в камеру гомогенизации смеси основных компонентов и добавок 13. Приготовленная композиционная смесь с помощью ленточного транспортера 14 подается в бункер композиционной смеси 15. Весовой дозатор 17 фасует в мешки готовую композиционную смесь с фиброаппликативами 18.

В случае использования схемы (А-В-С-С¹), рис. 6, при использовании в композиционной смеси базальтовых волокон (в дальнейшем – фиброаппликатив) или спёка («королька» – механоактивированного кремнеземистого компонента), для их выделения из общей массы материала используется вибрационно-центробежный агрегат 22. Полученные технологические компоненты смеси подаются в бункера добавок 10, 11 для последующей гомогенизации с другими материалами.

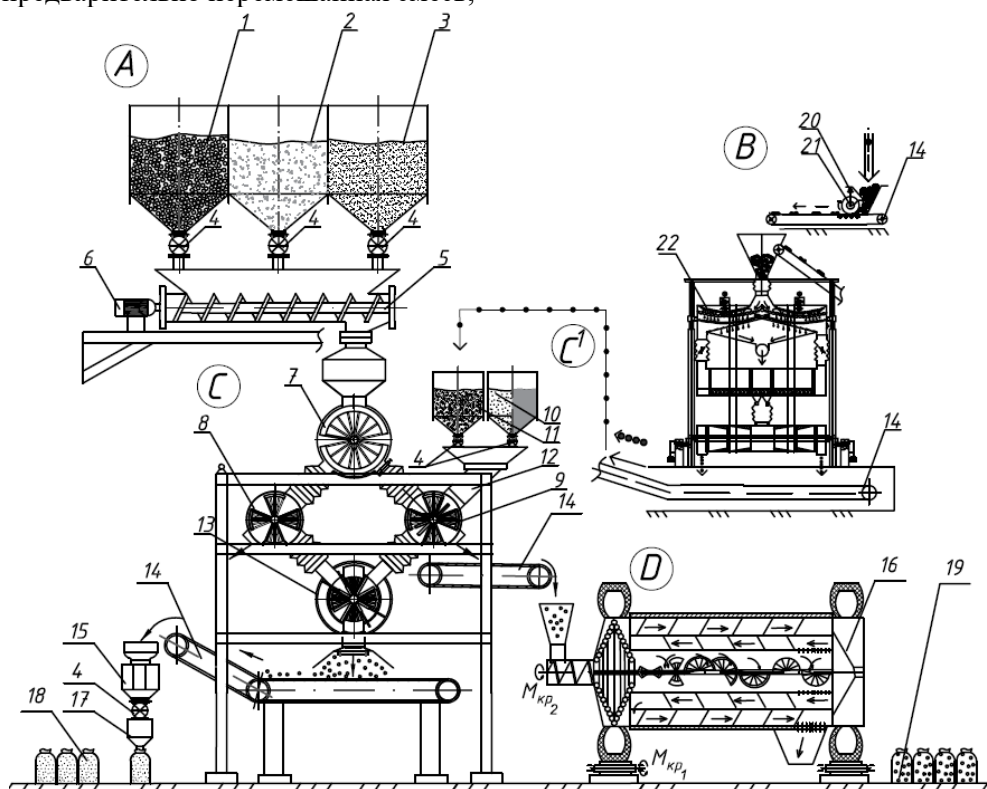


Рис. 6. Технологическая линия для получения композиционных смесей с техногенными компонентами:
1–3 – бункера основных компонентов; 4 – питатели; 5 – общий транспортирующий шнек исходных материалов;
6 – мотор-редуктор; 7 – камера макросмешивания; 8 – камера микросмешивания; 9 – камера гомогенизации добавок; 10, 11 – бункера добавок; 12 – патрубок из бункеров добавок; 13 – камера гомогенизации смеси основных компонентов и добавок; 14 – ленточный питатель; 15 – бункер композиционной смеси;
16 – барабанно-винтовой агрегат; 17 – весовой дозатор; 18 – склад КС с фиброаппликативами; 19 – склад агломерированной КС с ТУ; 20 – бункер исходного ТВМ; 21 – уплотняющее устройство ТВМ;
22 – вибрационно-центробежный агрегат

В случае использования схемы (С-С¹-D), рис. 6, в бункер 10 добавок композиционных смесей подается технический углерод (ТУ). Далее с помощью питателей 4 через патрубок 12 материал поступает в камеру гомогенизации добавок 9. После высокоскоростного смешения в камере 9, посредством ленточного транспортера 14, технологические компоненты поочередно подаются в барабанно-винтовой агрегат, где происходит процесс агломерирования. Полученная продукция отправляется на склад 18.

Основными конструктивными решениями барабанно-винтового агрегата для агломерирования техногенных материалов являются: спиралевидный блок микрогранулирования, обеспечивающий образование микроразродышей, размещенный между загрузочным устройством и центральным барабаном; установленные на центральном валу специальные устройства – разнонаправленные двухзаходные винтовые лопасти (ДВЛ), с углами разворота $\alpha = 80\text{--}120^\circ$, способствующие упрочнению микрогранулята; однозаходные винтовые лопасти (ОВЛ), с углами смещения $\beta = 70\text{--}130^\circ$, обеспечивающее движение гранулята по винтовым траекториям и окончательное формирование гранул; разнонаправ-

ленные однозаходные винтовые лопасти с углами разворота $\gamma = 160\text{--}200^\circ$, осуществляющие классификацию полученного гранулята.

Разработанная технологическая линия позволяет получать однородные композиционные смеси различных составов и технологического назначения. В качестве примера, нами приведены результаты исследований состава композиционной смеси и прочностных характеристик, сформованных образцов с использованием полученных из ТМ компонентов – технического углерода и механоактивированного кремнеземистого компонента («корольков»).

Целью исследований являлось определение рационального состава композиционной смеси, а также расширение технологических возможностей (областей использования) КС и сформованных изделий (повышение прочностных характеристик; возможности регулирования тепло и токопроводности, для производства теплоизоляционной продукции и др.).

Графические зависимости прочности цементного камня при сжатии образцов ($\sigma_{сж}$, МПа) от количества вводимых добавок ($C_{ту}$, % и $C_{SiO2мех}$, %) и водоцементного отношения (В/Ц, ед) представлены на рис. 7.

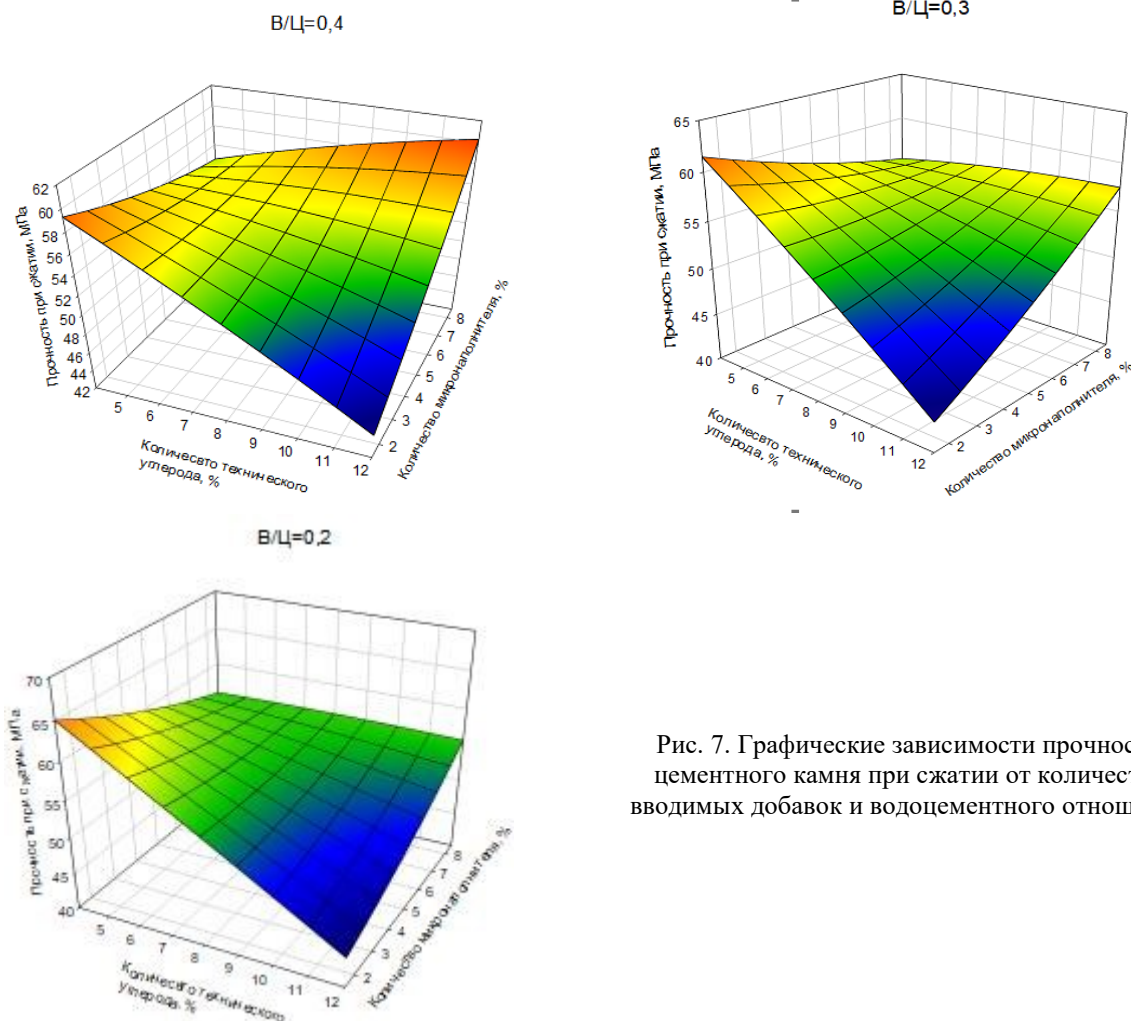


Рис. 7. Графические зависимости прочности цементного камня при сжатии от количества вводимых добавок и водоцементного отношения

Образцы с полученным соотношением компонентов (расходе ТУ 4 %, добавки тонкомолотых «корольков» ($S_{уд}=800 \text{ м}^2/\text{кг}$) 6 %), но при разном водоцементном отношении, были изучены на водопоглощение по следующему уравнению:

$$W_m = (m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}) \cdot 100\% / m_{\text{сух}} \quad (1)$$

где $m_{\text{нас}}$ – масса образца насыщенного водой, кг;
 $m_{\text{сух}}$ – масса сухого образца, кг

$$W_m = (13,49 - 12,54) / 12,54 = 7,6\% \text{ (В/Ц 0,4)}$$

$$W_m = (16,48 - 15,69) / 15,69 = 5,0\% \text{ (В/Ц 0,3)}$$

$$W_m = (16,36 - 15,96) / 15,96 = 2,5\% \text{ (В/Ц 0,2)}$$

Минимальным водопоглощением в 3 раза меньшим по сравнению с В/Ц=0,4 обладает состав с В/Ц=0,2. Это связано с наличием меньшего количества открытых пор и пустот в образцах. При этом при анализе микроструктуры образцов состава № 3, (В/Ц=0,2) (рис. 8) отражены очертания пузырьков вовлеченного воздуха, формирующие закрытую пористость.

Анализ микроструктуры образцов при различных значениях водоцементного отношения, содержания ТУ 5 %, добавки механоактивированных «корольков» – 6 %, показал общую для всех составов картину – частицы углерода максимально покрыты гидратными новообразованиями. Частица встраивается в цементную матрицу, являясь центром кристаллизации.

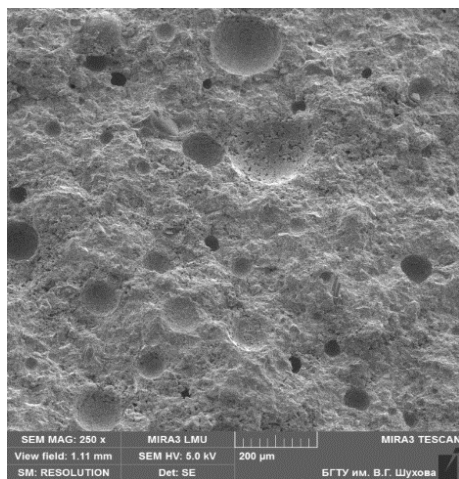


Рис. 8. Структура образца состава № 3 (В/Ц=0,2); ТУ=4 %

Таким образом, установлено, что наибольшие значения прочности сформованных образцов достигаются при содержании механоактивированных «корольков» ($S_{уд} = 800 \text{ м}^2/\text{кг}$) – 6 % от массы вяжущего. Это повышает показатель прочности образцов на 26 %. В то же время введение технического углерода свыше 4% снижает

показатель $\sigma_{сж}$. Водоцементное значение В/Ц = 0,2 является наиболее рациональным.

Наличие кварца в аморфной фазе способствует интенсификации процесса гидратации путем активного взаимодействия с выделяющимся при гидратации портландцемента портландитом.

Механоактивированные «корольки» выступают центрами кристаллизации, создавая коагуляционные контакты между частицами твердой фазы. Наблюдается эффект водоудерживающей способности вяжущей среды.

При гидратации создаются условия последовательного роста гидратных новообразований позволяя проводить синтез с минимальными внутренними напряжениями и объемными деформациями.

Гранулирование ТУ позволяет снизить его гидрофобность и решить проблему равномерного распределения углеродных частиц при гомогенизации сырьевой смеси в присутствии воды.

При использовании рециркуляционного смесителя комбинированного действия обеспечивается высокоэффективная постадийная гомогенизация гетерогенных компонентов смеси, полученных из различных ТМ.

Выводы.

1. Обоснована и практически доказана целесообразность использования гетерогенных компонентов (фибронеполнителей) и механоактивированных кремнеземсодержащих спеков включений («корольков») из базальтовых волокнистых отходов; технического углерода – продукта термолизной переработки полимерсодержащих отходов и др., полученных из различных техногенных материалов.

2. Разработаны патентозащищенные конструкции агрегатов и способы переработки техногенных материалов:

– Устройство и способ переработки волокнистых техногенных материалов для получения фибронеполнителей (варианты), патент РФ №2692624; Устройство для вибро-центробежной классификации ТМ, патент РФ № 2774302;

– Способ низкотемпературной переработки органических ТКО, патент РФ №274425; Установка для низкотемпературного термолиза ТКО, патент РФ № 2773396;

– Барабано-винтовой агрегат для гранулирования ТМ и их обработки, патент РФ № 2748629;

– Рециркуляционный смеситель комбинированного действия, патент РФ № 2788202.

3. Разработана и апробирована технологическая линия для приготовления гомогенных композиционных смесей с гетерогенными ком-

понентами, полученных из техногенных материалов (фибронеполнителей и механоактивированных кремнеземистых добавок, технического углерода – продукта термолизной переработки полимерсодержащих отходов и др.).

4. Разработан и реализован способ приготовления сухой строительной смеси патент РФ №2786931 с использованием гетерогенных компонентов из техногенных материалов.

5. Проведены экспериментальные исследования по изучению вещественного состава композиционной смеси с использованием технического углерода и механоактивированного кремнеземистого компонента (минеральной добавки) из спеков базальтовых волокнистых отходов. Установлено, что при изготовлении бетонных изделий из гомогенизированной цементно-песчанной композиционной смеси композиционной смеси ($V/C=0,2$) с добавками технического углерода 5 % и механоактивированных «корольков» – спеков $S_{уд}=800 \text{ м}^2/\text{кг}$ – 6 % от массового содержания вяжущего; механическая прочность образцов – $\sigma_{сж28} = 57 \text{ МПа}$ на 26 % превышает прочность стандартных образцов ($\sigma_{сж.ст.28} = 45 \text{ МПа}$).

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN-2024-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глаголев С.Н., Шеин Н.Т., Севостьянов В.С., Оболонский В.В., Шамгулов Р.Ю. Технологии комплексной переработки твердых коммунальных отходов // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 12. С. 11–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15
2. Цховребов, Э. С. О мерах повышения уровня ресурсосбережения с учётом снижения экологической опасности отходов в строительстве и городском хозяйстве // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 1. С. 83–96. DOI: 10.25686/2542-114X.2022.1.83
3. Тухарели В.Д., Чередниченко Т.Ф., Акчурин Т.К. Технологии бетонов специального назначения с использованием техногенных отходов // Наука и образование: архитектура, градо-

строительство и строительство : материалы Международной конференции, посвященной 80-летию строительного образования и 40-летию архитектурного образования Волгоградской области, Волгоград, 06–10 сентября 2010 года. – Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. С. 334–336.

4. Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.А., Сайдумов М.С., Омаров А.О. Разработка составов, наполненных вяжущих на основе вторичного сырья для монолитных высокопрочных бетонов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46, № 3. С. 129–138. DOI 10.21822/2073-6185-2019-46-3-129-138

5. Клавдиева Т.Н., Акчурин Т.К. Внедрение в состав строительных композитов техногенного сырья в целях снижения себестоимости готовой продукции и улучшения экологической ситуации региона // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы VI Международной научно-технической конференции, Волгоград, 13–14 ноября 2011 года / Редколлегия: С.Ю. Калашников, А.Н. Богомолов, В.А. Пшеничкина, О.В. Бурлаченко, Т.К. Акчурин, А.В. Жиделёв. – Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2011. С. 180–183.

6. Родин А.И., Якунин В.В., Богданов А.С., Утюгова Е.С. Влияние химического состава отходов производства минеральной ваты на физико-механические свойства геополимеров. В сборнике: Прогрессивные технологии в современном машиностроении. Композиционные строительные материалы. Теория и практика. Сборник статей XIV Международной научно-технической конференции. 2019. С. 94–98.

7. Majda P., Katja K., Jakob K., Uroš J., Vilma D. Sustainable Alkali-Activated Slag Binders Based on Alternative Activators Sourced From Mineral Wool and Glass Waste // Frontiers in Materials. 2022. Vol. 9. 902139. DOI: 10.3389/fmats.2022.902139

8. Klyuev S., Sevostyanov V., Sevostyanov M., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Protsenko A., Goryagin P., Babukov V., Shamgulov R., Fediuk R., Sabitov L. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 16. e01071. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01071

9. Shyong Ya.Z., Abd Khalid N.H., Haron Z., Mohamed A. Waste Mineral Wool and Its Opportunities – A Review // Materials. 2021. 14(19). 5777. DOI: 10.3390/ma14195777

10. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Ilkainen M. Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor // *Materials*. 2016. 9. 312. DOI: 10.3390/ma9050312.
11. Ilkainen M., Yliniemi J., Walkley B. Nanostructural evolution of alkali-activated mineral wools // *Cement and Concrete Composites*. 2019. 21. 103472 DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103472
12. Yerofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Yakunin V.V., Ermakov A.A. Light geopolymers from waste products of mineral wool production // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 93(1). Pp. 3–12. DOI: 10.18720/MCE.93.1
13. Патент РФ № 2692624. Устройство и способ переработки волокнистых техногенных материалов для получения фиброполнителей (варианты) / М.В. Севостьянов, В.А. Полуэктова, В.С. Севостьянов, В.В. Сирота, В.И. Уральский, И.Г. Мартаков, В.А. Бабуков; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова, заявка на патент № 2018131819, заявл.: 03.09.2018, опубл.: 25.06.2019, Бюл. № 18.
14. Патент РФ № 2774302. Устройство для вибрационно-центробежной классификации техногенных волокнистых материалов / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, М.В. Севостьянов, В.В. Оболенский, В.А. Бабуков, А.В. Уральский, В.Ю. Шаповалов; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», заявка на патент № 2021137137 заявл.: 15.12.2021, опубл.: 17.06.2022, Бюл. № 17.
15. Rezaei M., Panahandeh M., Razavi M.J., Berto F. Experimental study of the simultaneous effect of nano-silica and nano-carbon black on permeability and mechanical properties of the concrete // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019. 104. 102391. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102391
16. Yuan H.-W., Lu C.-H., Xu Z.-Z., Ni Y.-R., Lan X.-H. Mechanical and thermal properties of cement composite graphite for solar thermal storage materials // *Sol. Energy*. 2012. 86. Pp. 3227–3233.
17. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Бочкин В.С., Якунин В.В., Чегодайкин А.М., Казначеев С.В. Физико-механические характеристики цемента, модифицированного отходами минеральной ваты // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 10. С. 10–15. DOI: 10.12737/article_5bd95a707f00e2.65839546
18. Патент РФ № 2744225 Способ низкотемпературной переработки органических твердых коммунальных отходов и установка для его реализации / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболенский В.В., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», заявка на патент № 2020124265, заявл.: 22.07.2020; опубл.: 03.03.2021, Бюл. № 7.
19. Патент РФ № 2748629 Барабанно-винтовой агрегат для гранулирования техногенных материалов и их обработки / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Шамгулов Р.Ю., Перелыгин Д.Н., Оболенский В.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», заявка на патент № 2020129204 заявл.: 03.09.2020; опубл.: 28.05.2021, Бюл. № 16.
20. Патент РФ № 2786931 Сухая строительная смесь / С. В. Ключев, С. В. Золотарева, Р. С. Федюк [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», заявка на патент № 2022125282, заявл.: 27.09.2022, опубл.: 26.12.2022, Бюл. № 36.
21. Шведова М.А., Артамонова О.В. Особенности формирования цементных композиционных материалов при микро- и наномодифицировании многокомпонентными добавками // *Химия, физика и механика материалов*. 2021. № 4(31). С. 4–29.
22. Патент РФ № 2788202 Рециркуляционный смеситель комбинированного действия / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Проценко [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова"; заявка на патент № 2022112968, заявл.: 13.05.2022, опубл.: 17.01.2023, Бюл. № 2.

Информация об авторах

Севостьянов Максим Владимирович, доктор технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: msev31@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Агеева Марина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций E-mail: ageevams@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Севостьянов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail:svs-3149@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Фомина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail:fomina.katerina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Проценко Анастасия Максимовна, аспирант, ассистент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: nastya12rudchenko8@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бабуков Владимир Александрович, соискатель, ведущий инженер кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: babukov-v@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шамгулов Роман Юрьевич, аспирант кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: Shamguloff@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 16.04.2024 г.

© Севостьянов М.В., Агеева М.С., Севостьянов В.С., Фомина Е.В., Проценко А.М.,
Бабуков В.А., Шамгулов Р.Ю., 2024

**Sevostyanov M.V., Ageeva M.S., Sevostyanov V.S., Fomina E.V., *Protsenko A.M.,
Babukov V.A., Shamgulov R. Yu.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
**E-mail: nastya12rudchenko8@gmail.com*

SCIENTIFIC AND TECHNICAL DEVELOPMENTS, RESEARCH OF RESOURCE-SAVING EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF COMPOSITE MIXTURES WITH MAN-MADE COMPONENTS

Abstract. The article considers the expediency of complex processing of man-made materials. The possibilities of obtaining building materials from secondary material resources, such as waste from the production of basalt fibrous insulation materials, and obtaining carbon black from rubber waste by thermolysis technology have been studied. Patent-protected resource-saving machines and units for complex processing of man-made materials with various physical and mechanical characteristics are presented. The separation of speck ("kinglet") as a separate type of semi-finished product with its further mechanical activation is justified. Production of fibers of various lengths, spherical granulate from secondary basalt fibrous waste, agglomerated carbon black. The necessity of homogenization of composite mixtures in a recirculating mixer of combined action has been studied. A technological complex for the production of dry building mixes with various components is presented. The physicomechanical characteristics and physico-chemical properties of composite mixtures were studied using multifactorial planning of the experiment. As a result of the conducted research, rational compositions of composite mixtures have been established. In the manufacture of concrete products from a homogenized cement-sand composite mixture ($W/C = 0.2$) with additives of 5 % carbon black and mechanically activated "kings" – sinters $Sud=800 \text{ m}^2/\text{kg}$ – 6 % of the mass content of the binder; the mechanical strength of the samples – $\sigma_{cj_{28}} = 57 \text{ MPa}$ 26 % higher than the strength of standard samples ($\sigma_{cj.st.28} = 45 \text{ MPa}$).

Keywords: resource conservation, technogenic materials, speck ("korolek"), mechanical activation, carbon black, mixing, composite materials, agglomeration, technological line.

REFERENCES

1. Glagolev S.N., Shein N.T., Sevostyanov V.S., Obolonsky V.V., Shamgulov R. Yu. Technologies of complex processing of municipal solid waste [Tekhnologii kompleksnoj pererabotki tverdyh kom-

munal'nyh othodov]. Ecology and industry of Russia. 2020. Vol. 24. No. 12. Pp. 11–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15. (rus)

2. Tskhovrebov E.S. On measures to increase the level of resource conservation, taking into account the reduction of the environmental hazard of

waste in construction and urban management [O me-rah povysheniya urovnya resursosberezheniya s uchyotom snizheniya ekologicheskoy opasnosti othodov v stroitel'stve i gorodskom hozyajstve]. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2022. No. 1. Pp. 83–96. DOI: 10.25686/2542-114X.2022.1.83 (rus)

3. Tukhareli V.D., Cherednichenko T.F., Akchurin T.K. Technologies of special-purpose concrete using man-made waste [Tekhnologii betonov special'nogo naznacheniya s ispol'zovaniem tekhnogennykh othodov]. Science and education: architecture, urban planning and construction : materials of the International Conference dedicated to the 80th anniversary of construction education and the 40th anniversary of architectural education of the Volgograd region, Volgograd, September 06-10, 2010. Volgograd: Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2010. Pp. 334–336. (rus)

4. Alaskhanov A.H., Murtazaeva T.S.A., Saidumov M.S., Omarov A.O. Development of compositions of filled binders based on secondary raw materials for monolithic high-strength concretes [Razrabotka sostavov napolnennykh vyazhushchih na osnove vtorichnogo syr'ya dlya monolitnykh vysokoprochnykh betonov]. Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical sciences. 2019. Vol. 46, No. 3. Pp. 129–138. DOI 10.21822/2073-6185-2019-46-3-129-138 (rus)

5. Klavdieva T. N., Akchurin T. K. Introduction of technogenic raw materials into the composition of building composites in order to reduce the cost of finished products and improve the environmental situation of the region [Vnedrenie v sostav stroitel'nykh kompozitov tekhnogennogo syr'ya v celyakh snizheniya sebestoimosti gotovoy produktsii i uluchsheniya ekologicheskoy situatsii regiona]. Reliability and durability of building materials, structures and foundations : materials of the VI International Scientific and Technical Conference, Volgograd, November 13-14, 2011. Editorial Board: S.Y. Kalashnikov, A.N. Bogomolov, V.A. Pshenichkina, O.V. Burlachenko, T.K. Akchurin, A.V. Zhidelev. Volgograd: Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2011. Pp. 180–183. (rus)

6. Rodin A.I., Yakunin V.V., Bogdanov A.S., Zhelugova E.S. The influence of the chemical composition of waste from the production of mineral wool on the physical and mechanical properties of geopolymers [Vliyanie himicheskogo sostava othodov proizvodstva mineral'noj vaty na fiziko-mekhanicheskie svoystva geopolimerov]. In the collection: Progressive technologies in modern mechanical engineering. Composite building materials. The-

ory and practice. Collection of articles of the XIV International Scientific and Technical Conference. 2019. Pp. 94–98. (rus)

7. Majda P., Katja K., Jakob K., Uroš J., Vilma D. Sustainable Alkali-Activated Slag Binders Based on Alternative Activators Sourced From Mineral Wool and Glass Waste. *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. 902139. DOI: 10.3389/fmats.2022.902139

8. Klyuev S., Sevostyanov V., Sevostyanov M., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Protsenko A., Goryagin P., Babukov V., Shamgulov R., Fediuk R., Sabitov L. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 16. e01071. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01071

9. Shyong Ya.Z., Abd Khalid N.H, Haron Z., Mohamed A. Waste Mineral Wool and Its Opportunities – A Review. *Materials*. 2021. 14(19). 5777. DOI: 10.3390/ma14195777

10. Yliniemi J., Kinnunen P., Karinkanta P., Ilkainen M. Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor. *Materials* 2016. 9. 312. DOI: 10.3390/ma9050312.

11. Ilkainen M., Yliniemi J., Walkley B. Nanostructural evolution of alkali-activated mineral wools. *Cement and Concrete Composites*. 2019. 21. 103472. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2019.103472

12. Yerofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Yakunin V.V., Ermakov A.A. Light geopolymers from waste products of mineral wool production. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 93(1). Pp. 3–12. DOI: 10.18720/MCE.93.1

13. Sevostyanov M.V., Poluektova V.A., Sevostyanov V.S., Sirota V.V., Uralsky V.I., Martakov I.G., Babukov V.A. Device and method of processing fibrous technogenic materials for the production of fiber fillers (variants). Patent RF, no. 2692624, 2019.

14. Sevostyanov V.S., Shein N.T., Sevostyanov M.V., Obolonsky V.A., Babukov A.V., Uralsky V.Yu. Shapovalov. Device for vibration-centrifugal classification of technogenic fibrous materials. Patent RF, no. 2774302, 2022.

15. Rezaei M., Panahandeh M., Razavi M.J., Berto F. Experimental study of the simultaneous effect of nano-silica and nano-carbon black on permeability and mechanical properties of the concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019. 104. 102391. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.102391

16. Yuan H.-W., Lu C.-H., Xu Z.-Z., Ni Y.-R., Lan X.-H. Mechanical and thermal properties of cement composite graphite for solar thermal storage materials. *Sol. Energy* 2012. 86. P. 3227–3233.

17. Yerofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Yakunin V.V., Chegodaykin A.M., Kaznacheev S.V. Physical and mechanical characteristics of cement

modified with mineral wool waste [Fiziko-mekhanicheskie harakteristiki cementa, modifitsirovannogo othodami mineral'noj vaty]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 10. Pp. 10–15. DOI:10.12737/article_5bd95a707f00e2.65839546 (rus)

18. Glagolev S.N., Sevostyanov V.S., Shein N.T., Obolonsky V.V., Sevostyanov M.V., Shamgulov R.Yu., Pereygin D.N. A method of low-temperature processing of organic solid municipal waste and an installation for its implementation. Patent RF, no. 2744225, 2021.

19. Sevostyanov V.S., Shein N.T., Sevostyanov M.V., Shamgulov R.Yu., Pereygin D.N., Ob-

olonsky V.V. Drum-screw unit for granulating technogenic materials and their processing. Patent RF, no. 2748629, 2021.

20. Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Fedyuk R.S. Dry building mix. Patent RF, no. 2786931, 2022.

21. Shvedova M.A., Artamonova O.V. Features of the formation of cement composite materials during micro- and nanomodification with multicomponent additives [Osobennosti formirovaniya cementnykh kompozitsionnykh materialov primikro- i nanomodifitsirovani mnogokomponentnymi dobavkami]. Chemistry, physics and mechanics of materials. 2021. No. 4(31). Pp. 4–29.

22. Glagolev S.N., Sevostyanov V.S., Protsenko A.M. Recirculating mixer of combined action. Patent RF, no. 2788202, 2023.

Information about the authors

Sevostyanov, Maxim V. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: msev31@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Ageeva, Marina S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: ageevams@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Sevostyanov, Vladimir S., Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: sv3-3149@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Fomina, Ekaterina V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: fomina.katerina@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Protsenko, Anastasia M. Postgraduate student, Assistant. E-mail: nastya12rudchenko8@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Babukov, Vladimir A. Applicant, leading engineer. E-mail: babukov-v@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Shamgulov, Roman Y. Postgraduate student. E-mail: Shamguloff@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukovastr., Belgorod, 308012, Russia.

Received 16.04.2024

Для цитирования:

Севостьянов М.В., Агеева М.С., Севостьянов В.С., Фомина Е.В., Проценко А.М., Бабуков В.А., Шамгулов Р.Ю. Высокотехнологичное оборудование и технологии для производства композиционных смесей с техногенными компонентами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 98–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110

For citation:

Sevostyanov M.V., Ageeva M.S., Sevostyanov V.S., Fomina E.V., Protsenko A.M., Babukov V.A., Shamgulov R.Yu. Scientific and technical developments, research of resource-saving equipment and technologies for the production of composite mixtures with man-made components. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 98–110. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-111-121

Безмен П.А., Емельянова О.В., Яцун С.Ф.Юго-Западный государственный университет***E-mail: pbezmen@yahoo.com*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛЕТА ПРИВЯЗНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Аннотация. Существует проблема оперативного получения достоверной и достаточной информации об окружающей обстановке, в том числе на труднодоступных территориях, где отсутствует связь или требуется длительное время стационарного мониторинга с целью обеспечения безопасности или охраны важных объектов. В статье рассматриваются вопросы математического моделирования автоматизированной тросовой стоянки беспилотного летательного аппарата (платформы) в вертикальной плоскости.

Целью исследования является создание инструментальных средств проектирования привязных летательных платформ, оснащенных автоматизированной тросовой системой удержания с учетом внешних случайных возмущений атмосферы при вертикальном полёте. Для достижения поставленной цели необходимо провести математическое моделирование полета привязных беспилотных летательных платформ с учетом внешних активных и реактивных сил, а также возмущающих сил – случайных воздушных потоков, которые могут быть значительными по силе и переменными по направлению, что, несомненно, влияет на устойчивое положение привязной платформы. Применение алгоритма расширенного фильтра Калмана в качестве наблюдателя состояния привязной летательной платформы при математическом моделировании полета платформы делает возможным учет случайных возмущений атмосферы как частично детерминированной среды с целью уменьшения ошибки положения летательного аппарата при его управлении.

Для решения поставленной задачи использовались методы классической механики, теории устойчивости движения, оптимального управления, теории оценивания, параметрической оптимизации.

Представлены результаты математического моделирования полета привязной летательной платформы – привязного коптера – с учетом случайных атмосферных возмущений. Результаты числительных экспериментов позволили установить, что случайные возмущения атмосферы могут оказывать существенное влияние на управление летательным аппаратом по положению.

Ключевые слова: привязная платформа, моделирование, фильтр Калмана, наблюдатель состояния.

Введение. Стремительное развитие информационных технологий, микропроцессорной техники, систем автоматического управления и связи для беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с одной стороны и ограничения или подавление их оптико-электронных компонентов приводит к переосмыслению концепции применения БЛА.

Существует ряд задач по сбору информации и стационарному наблюдению за объектами в труднодоступных местах (леса, горные ущелья, геологические разработки и др.), где прием сигналов затруднен, подавляется или отсутствует вовсе. Ограниченное время работы бортового аккумулятора (в среднем 20–40 мин. для аппаратов среднего класса), и, соответственно, время нахождения летательного аппарата в воздухе требует постоянного присутствия оператора для его обслуживания: подзарядки или замены.

Применение проводного наземного источника питания для летательного аппарата позволит решить задачу длительности нахождения аппарата в воздухе и позволит нести полезную

нагрузку в виде контролирующих приборов, тепловизоров и др., а проводная сеть передачи данных, например, волоконно-оптический кабель, канал которого не подвержен наличию помех, позволит обезопасить передачу сведений независимо от действия РЭБ.

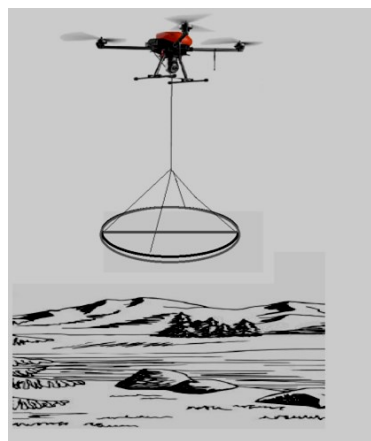
Однако, наличие «привязи» накладывает ограничения на рабочее пространство и динамику в связи с необходимостью удержания летательного аппарата с полезной нагрузкой (до 10–30 кг) на высоте 20–100 м с помощью кабельтроса для электрической нагрузки 10–15кВт [1].

Применение беспилотных коммуникационных платформ с привязанным к ним на кабельтросе оборудованием для нужд аэрогеофизики, например, для гамма-спектрометрии (рис. 1-а), явилось преддверием для развития привязных стационарных телекоммуникационных платформ [2] (рис. 1-б).

Системы привязных летательных платформ NTFPs (англ. *Networked Tethered Flying Platforms* – сетевые привязные летающие платформы), являются частью телекоммуникационных структур и промежуточным звеном между спутниками и

наземной связью. Кабель-трос обеспечивает непрерывную передачу данных и питания, источником которого может служить генератор, электростанция и т.п. С точки зрения беспроводной телекоммуникационной связи использование NTFRs значительно дешевле спутников и башен-вышек. Но существуют и ограничения на приме-

нение рассматриваемых платформ, например, отсутствие мобильности, ограниченная длина кабель-троса, надежность винтомоторной группы используемых беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Поэтому сферами применения NTFRs являются сбор и передача информации по экологической, биологической, научно-исследовательской и военной деятельности [3–5].



а)



б)

Рис. 1. Квадрокоптер: а – с исследовательским оборудованием; б – привязной коптер

Вопросами применения привязных платформ начали уделять внимание совсем недавно. Прародителями NTFRs можно считать аэростаты – аппараты легче воздуха, к которым относятся: воздушные шары, стратостаты, дирижабли [6–9]. Так дирижабли, активно строившиеся во второй половине 19 века, имели ёмкости, которые заполнялись газом низкой плотности, например, гелием, и за счет разностей плотностей газа и воздуха могли не только перемещаться в любом направлении, но и долго находиться на определенном месте без затрат горючего, отключив двигатели. Использовались и привязные дирижабли для подъёма ретрансляторов, защиты от налетов авиации и пр., которые при подъёме, стоянке на высоте и спуске удерживались специальным тросом, нижний конец которого закреплялся на лебедке. Таким образом, происходила регулировка высоты подъёма и/или перемещение в горизонтальной плоскости. Стратостаты и воздушные шары используются и в настоящее время для наблюдений, сбора данных и экспериментов в атмосфере для метеорологии, географических исследований, аэрологии и в коммерческих целях. Продолжительность полета на воздушном шаре может варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как погодные условия, выбранная траектория полета, и происходит в нижних слоях атмосферы. В среднем, полет на воздушном шаре длится около часа. В отличие от воздушных шаров полет стратостатов проходит на больших высотах, в стратосфере.

На сегодняшний день недостаточно изучена проблема моделирования привязных беспилотных летательных платформ, которые подвержены влиянию случайных воздушных потоков. Этот фактор является одним из основных, влияющих на устойчивое положение привязной платформы, так как сила ветра может быть значительной по силе и переменной по направлению [10].

Целью работы является создание инструментальных средств проектирования привязных летательных платформ, оснащенных автоматизированной тросовой системой удержания с учетом внешних случайных возмущений атмосферы при вертикальном полёте.

Методы, оборудование, материалы. Рассмотрим расчетную схему привязной стационарной платформы, которая состоит из беспилотного летательного аппарата, например, гексакоптера (далее коптер) – 1, кабель-троса – 2, наматываемого на барабан-лебёдку – 3 и электрогенератора – 4 (рис. 2). Функциями кабель-троса 2 являются: удержание летательного аппарата в воздухе и его стабилизация, передача электропитания к двигателям, передача данных по оптоволокну.

Движение летательного аппарата рассматривается в инерциальной системе отсчета $OXYZ$, связанной с землей. Центр масс корпуса коптера C совпадает с началом подвижной системы координат $CX_1Y_1Z_1$. Ориентация летательного аппарата задаётся самолетными углами крена φ , тангажа θ и рысканья ψ [10–12].

На БЛА (рис. 2) действуют приведенные к центру масс C силы: тяги несущих винтов $\bar{F}_i$, тя-
жести корпуса и кабель-троса $\bar{G}$, сопротивления
движению воздуха относительно корпуса (возму-
щающее воздействие) $\bar{R}_C$ и натяжения кабель-
троса $\bar{T}$. Считаем, что кабель-трос находится в
натяжении, создаваемом механизмом лебёдки 3.

Проекции силы $\bar{T}$ на оси инерциальной си-
стемы отсчета определим как

$$T_x = T_{xy} \cdot \sin \gamma;$$

$$T_y = T_{xy} \cdot \cos \gamma;$$

$$T_z = \bar{T} \cdot \sin \alpha,$$

где $T_{xy} = \bar{T} \cdot \cos \alpha$ – проекция силы $\bar{T}$ на плос-
кость OXY .

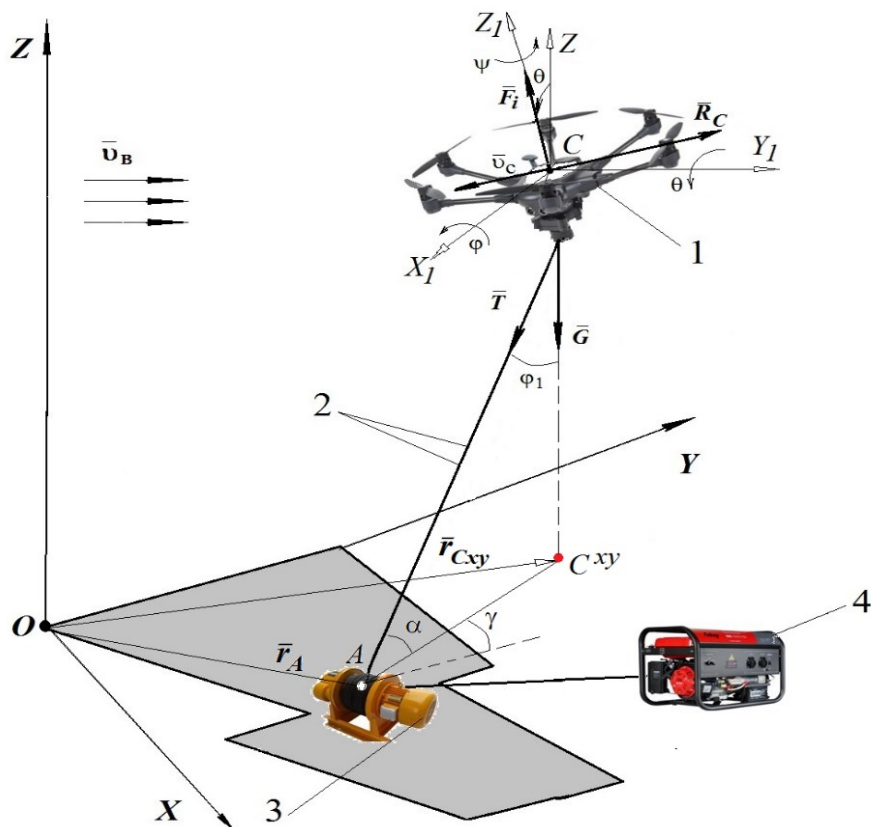


Рис. 2. Расчетная схема привязной стационарной платформы

Проекцией центра масс C коптера на плос-
кость OXY является точка C_{xy} , положение кото-
рой определим геометрически с помощью ра-
диус-векторов, образующих треугольник
 ΔOAC_{xy} (рис. 2):

$$\bar{r}_{C_{xy}} = [X_{C_{xy}} \quad Y_{C_{xy}} \quad 0]^T,$$

$$\bar{r}_A = [X_A \quad Y_A \quad 0]^T;$$

тогда углы α и γ могут быть найдены исходя из
выражений:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{X_A - X_{C_{xy}}}{Y_A - Y_{C_{xy}}},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Z_C}{\sqrt{(X_A - X_{C_{xy}})^2 + (Y_A - Y_{C_{xy}})^2}}.$$

Следует учесть, что масса кабель-троса явля-
ется переменной величиной, зависящей от его
длины, поэтому считаем силу тяжести как

$$G = m \cdot g = [m_0 + m_1(Z)] \cdot g,$$

где m – общая масса коптера и кабель-троса;

g – ускорение свободного падения;

m_0 – масса коптера;

$m_1(Z)$ – масса кабель-троса, зависящая от его
длины Z .

Движение коптера можно описать шестью
независимыми дифференциальными уравнени-
ями второго порядка. Методика построения урав-
нений подробно изложена в [10–12]. В общем
виде их можно представить в векторно-матрич-
ной форме следующим образом:

$$\bar{D}\ddot{q} + \bar{F}(q, \dot{q}) = \bar{M}, \quad (1)$$

где $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} m\mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ – оператор инерционности системы, $\mathbf{E}$ – единичная матрица, $I \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ – тензор инерции мультикоптера;

$\bar{\mathbf{q}} = [\bar{\mathbf{r}}_C \quad \bar{\boldsymbol{\beta}}]^T$ – оператор, задающий пространственное положение аппарата, $\bar{\boldsymbol{\beta}} = [\varphi \quad \theta \quad \psi]^T$ – угол, определяющий ориентацию аппарата, относительно центра масс C ;

$\dot{\bar{\mathbf{q}}} = [\dot{\bar{\mathbf{v}}}_C \quad \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}}]^T$ – оператор скорости, $\dot{\bar{\mathbf{v}}}_C = [\dot{X} \quad \dot{Y} \quad \dot{Z}]^T \in \mathfrak{R}^3$ – абсолютная скорость центра масс C тела в неподвижной системе отсчета, $\dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} = [\dot{\omega}_{x_1} \quad \dot{\omega}_{y_1} \quad \dot{\omega}_{z_1}]^T \in \mathfrak{R}^3$ – угловая скорость вращения аппарата в подвижной системе отсчета;

$\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{q}}) + \bar{\mathbf{R}}_C(\dot{\mathbf{q}})$ – вектор внешних сил;

$\bar{\mathbf{M}} = [\bar{\mathbf{F}} \quad \bar{\mathbf{M}}]^T$ – вектор управляющих воздействий: $\bar{\mathbf{F}} = T_{10} \cdot \bar{\mathbf{F}}_M = T_{10} \cdot [F_{X_1} \quad F_{Y_1} \quad F_{Z_1}]^T$ – вектор тяговых сил в проекциях на оси неподвижной системы отсчета, $\bar{\mathbf{M}} = [M_{X_1} \quad M_{Y_1} \quad M_{Z_1}]^T$ – вектор главного момента внешних сил относительно подвижной системы отсчета, T_{10} – матрица поворота систем координат $CX_1Y_1Z_1$ относительно $OXYZ$ [12].

На основании теорем об изменении импульса и кинетического момента системы относительно центра масс аппарата C , преобразуем уравнение (1) к виду [13–15]:

$$\begin{bmatrix} m\mathbf{E} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{\mathbf{v}}}_C \\ \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{L}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{F}} \\ \bar{\mathbf{M}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{L} = I \bar{\boldsymbol{\omega}}$ – кинетический момент.

Вектор силы сопротивления движению корпуса коптера в воздушной среде:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_C^{(0)} &= [\mathbf{R}_{CX}^{(0)} \quad \mathbf{R}_{CY}^{(0)} \quad \mathbf{R}_{CZ}^{(0)}]^T, \\ \bar{\mathbf{R}}_C^{(0)} &= -(\mu \bar{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{v}}^T k \bar{\mathbf{v}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где μ, k – матрицы эмпирических коэффициентов сопротивления, зависящие от геометрических параметров корпуса коптера, угла атаки несущих винтов;

$\bar{\mathbf{v}}$ – относительная скорость центра масс коптера, которая является разностью векторов скоростей центра масс $\bar{\mathbf{v}}_C$ системы координат OZ и вектора скорости воздушного потока $\bar{\mathbf{v}}_B$:

$$\bar{\mathbf{v}} = \bar{\mathbf{v}}_C - \bar{\mathbf{v}}_B. \quad (4)$$

Силу R_C будем рассматривать как случайное возмущающее воздействие на систему в форме «белого» гауссового шума. Случайные величины w_1, w_2, w_3 , действующие соответственно на величины $Z, \dot{Z}, \ddot{Z}$, составляют вектор шума $\mathbf{w}(t)$:

$$\mathbf{w}(t) = [w_1(t) \quad w_2(t) \quad w_3(t)]^T,$$

характеризующегося ковариационной матрицей вида

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix},$$

где $Z, \dot{Z}, \ddot{Z}$ – координата, скорость и ускорение центра масс коптера; t – некоторый момент времени; $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ – дисперсии случайных величин w_1, w_2, w_3 соответственно.

Основная часть. Опишем в дискретном времени k модель вертикального взлета (посадки) коптера как управляемой системы следующими выражениями [16–18]:

$$\mathbf{z}(k+1) = \mathbf{F}(\mathbf{z}(k), u(k)) + \mathbf{g} + \mathbf{w}(k), \quad (5)$$

$$y(k) = \mathbf{H}(\mathbf{z}(k)) + v(k), \quad (6)$$

где $v(k)$ – величина шума измерения, характеризуется дисперсией R ;

k – некоторый текущий момент времени;

$(k+1)$ – следующий за текущим момент времени;

$\mathbf{z}(k)$ – вектор состояния управляемой системы, переменные состояния которого – $z_1(k), z_2(k), z_3(k)$, имеют вид

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \\ z_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z(k) \\ \dot{Z}(k) \\ \ddot{Z}(k) \end{bmatrix};$$

$u(k)$ – управляющее воздействие;

$y(k)$ – величина выхода системы;

$\mathbf{F}(\bullet)$ – вектор-функция процесса изменения состояния размерностью 3;

$\mathbf{H}(\bullet)$ – вектор-функция процесса наблюдений размерностью 3;

$\mathbf{g}$ – вектор постоянных возмущающих воздействий размерностью 3;

$\mathbf{w}(k)$ – вектор шума процесса, размерность вектора 3 – характеризуется ковариационной матрицей $\mathbf{Q}$.

Определим функцию, задающую общую подъемную силу коптера:

$$\begin{aligned}
& F_M(Z(k), Z^*(k), F_{LOAD}(k), F_{MAX}, \Delta t, N, P, I, D) = \\
& \left[\begin{aligned} & Z_E(k) := Z^*(k) - Z(k) \\ & Z_I(k) := Z_I(k-1) + Z_E(k) \cdot \Delta t \\ & F := (P \cdot Z_E(k)) + (I \cdot Z_I(k)) + (D \cdot ((Z_E(k) - Z_E(k-1)) / \Delta t)) + F_{LOAD}(k) \\ & F \text{ если } 0 < F < N \cdot F_{MAX} \text{ иначе} \\ & 0 \text{ если } F \leq 0 \\ & \text{иначе } N \cdot F_{MAX} \end{aligned} \right]
\end{aligned}$$

где F_M – общая подъемная сила коптера;

$Z(k)$ – текущая высота полета коптера;

$Z^*(k)$ – требуемая высота полета коптера;

$F_{LOAD}(k)$ – сила нагрузки (сила тяжести коптера и кабель-троса плюс сила натяжения $\bar{T}$ кабель-троса);

F_{MAX} – максимальная подъемная сила одного привода (винтомоторной группы) коптера;

Δt – период времени (сек.) между моментом времени $(k-1)$ и моментом времени k ;

N – количество приводов (винтомоторных групп) коптера;

P, I, D – коэффициенты ПИД-регулятора: P – коэффициент пропорциональной составляющей, I – коэффициент интегральной составляющей, D – коэффициент дифференциальной составляющей;

$Z_E(k)$ – текущая ошибка вертикальной координаты коптера;

$Z_E(k-1)$ – предыдущая ошибка вертикальной координаты коптера;

$Z_I(k)$ – текущая ошибка интегральной составляющей;

$Z_I(k-1)$ – предыдущая ошибка интегральной составляющей;

$F(k)$ – вычисленная текущая общая подъемная сила приводов коптера, $0 < F \leq N \cdot F_{MAX}$.

Зададим функцию, определяющую массу кабель-троса зависимой от высоты $Z(k)$ полета коптера:

$$m_1(Z(k)) = k_m \cdot Z(k),$$

где k_m – коэффициент, задающий массу 1 метра кабель-троса (зависит от плотностей компонентов кабель-троса и его сечения);

$Z(k)$ – высота полета коптера в некоторый момент времени k .

Исходя из уравнения динамики вертикального полета коптера:

$$\begin{aligned}
& [m_0 + m_1(Z(k))] \cdot \ddot{Z}(k) = -[m_0 + m_1(Z(k))] \cdot g - [\mu \cdot \dot{Z}(k)] - T_C - R_C + F_M(\bullet), \\
& \ddot{Z}(k) = -g - \frac{[\mu \cdot \dot{Z}(k)]}{[m_0 + m_1(Z(k))]} - \frac{T_C}{[m_0 + m_1(Z(k))]} - \frac{R_C}{[m_0 + m_1(Z(k))]} + \frac{F_M(\bullet)}{[m_0 + m_1(Z(k))]},
\end{aligned}$$

где $Z(k), \dot{Z}(k), \ddot{Z}(k)$ – высота полета, скорость и ускорение коптера как материальной точки;

$m_1(\bullet)$ – функция, определяющая массу кабель-троса;

μ – коэффициент вязкости среды (вязкого сопротивления);

T_C – проекция силы натяжения кабель-троса на ось Z ;

R_C – проекция силы сопротивления движению корпуса коптера в воздушной среде на ось Z ;

$F_M(\bullet)$ – функция, задающая подъемную силу коптера;

$Z^*(\bullet)$ – функция, задающая требуемую высоту полета коптера.

Выразим вектор-функцию процесса изменения состояния $F(\bullet)$ системы коптера:

$$F(z(k), u(k)) = \begin{bmatrix} F_1(z(k)) \\ F_2(z(k)) \\ F_3(z(k), u(k)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z(k-1) + \dot{Z}(k) \cdot \Delta t + \ddot{Z}(k) \cdot \frac{\Delta t^2}{2} \\ \dot{Z}(k-1) + \ddot{Z}(k) \cdot \Delta t \\ -\left(\frac{\mu \cdot \dot{Z}(k)}{m_0 + k_m \cdot Z(k)} \right) - \left(\frac{T_C}{m_0 + k_m \cdot Z(k)} \right) + \left(\frac{u(k)}{m_0 + k_m \cdot Z(k)} \right) \end{bmatrix},$$

где $u(k) = F_M(\bullet)$;

Δt – период времени между моментом времени $(k-1)$ и моментом времени k .

Определим вектор-функцию $H(\bullet)$ процесса наблюдений:

$$H(z(k)) = [H_1(z(k)) \quad H_2(z(k)) \quad H_3(z(k))] = [Z(k) \quad 0 \quad 0],$$

таким образом, единственной наблюдаемой величиной системы является высота $Z(k)$ полета коптера.

Проведем линеаризацию вектор-функций $F(\bullet)$ и $H(\bullet)$ – получим матрицу Якоби $J_{F_x}(k)$ и векторы $J_{F_u}(k)$ и $J_{H_x}(k)$:

$$J_{F_x} = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial z} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial z_3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_3(\bullet)}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial F_3(\bullet)}{\partial z_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ k_m \cdot \frac{\mu \cdot \dot{Z}(k) + T_C - u(k)}{(m_0 + k_m \cdot Z(k))^2} & -\mu & 0 \end{bmatrix},$$

при условии, что: $Z(0) = 0$, $\dot{Z}(0) = 0$, $u(0) = 0$, $m_0 \gg m_1(k)$ имеем:

$$J_{F_x} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ k_m \cdot \frac{T_C}{m_0^2} & -\mu & 0 \end{bmatrix}; J_{F_u} = \frac{\partial F(\bullet)}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\bullet)}{\partial u} \\ \vdots \\ \frac{\partial F_3(\bullet)}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ m_0 + k_m \cdot Z(k) \end{bmatrix},$$

при условии, что $Z(0) = 0$ имеем:

$$J_{F_u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{m_0} \end{bmatrix}^T; J_{H_x} = \frac{\partial H(\bullet)}{\partial z} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(\bullet)}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial H_3(\bullet)}{\partial z_3} \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0].$$

Вектор постоянных возмущающих воздействий имеет вид: $g = [0 \ 0 \ -g]^T$.

Используя полученные матрицу $J_{F_x}(k)$ и векторы $J_{F_u}(k)$ и $J_{H_x}(k)$, перепишем выражения (5) и (6):

$$z(k+1) = J_{F_x} \cdot z(k) + J_{F_u} \cdot u(k) + g + w, \quad (7)$$

$$y(k) = J_{H_x} \cdot z(k) + v. \quad (8)$$

С целью математического моделирования вертикального полета коптера с кабелем-тросом в качестве наблюдателя состояния был использован алгоритм расширенного фильтра Калмана (РФК, англ. *extended Kalman filter* – *EKF*), который в настоящее время широко используется в робототехнике [19-21].

Для проведения численного эксперимента определим функцию, задающую требуемую высоту полета коптера:

$$Z^*(k, k_0, k_1, k_2, k_3, s, p, d) = \begin{cases} s & \text{если } k \leq k_0 \\ \left(\frac{p-s}{k_1-k_0} \right) \cdot k + \left(\frac{k_1 \cdot s - k_0 \cdot p}{k_1-k_0} \right) & \text{если } (k_0 < k) \wedge (k \leq k_1) \\ p & \text{если } (k_1 < k) \wedge (k \leq k_2) \\ \left(\frac{d-p}{k_3-k_2} \right) \cdot k + \left(\frac{k_3 \cdot p - k_2 \cdot d}{k_3-k_2} \right) & \text{если } (k_2 < k) \wedge (k \leq k_3) \\ d & \text{если } k_3 < k \\ 0 & \text{иначе} \end{cases},$$

где k_0, k_1, k_2, k_3 – моменты времени, $k_0 < k_1 < k_2 < k_3$;

s – начальное постоянное значение функции при $k \leq k_0$;

p – установившееся постоянное значение функции при $k_1 < k \leq k_2$;

d – конечное постоянное значение функции при $k_3 < k$.

В ходе математического моделирования вертикального полета коптера принимались следующие значения описанных параметров:

$\Delta t = 10^{-3}$ сек, $m_0 = 6$ кг, $\mu = 10$, $T_C = 10$ Н, $k_m = 0,06$ кг, $F_{MAX} = 15$ Н, $N = 6$, $P = 200$, $I = 10$, $D = 10$, $\alpha(0) = \frac{\pi}{2}$; начальные условия моделирования (при $k = 0$): $Z(0) = 0$ м, $\dot{Z}(0) = 0$ м/с, $\ddot{Z}(0) = 0$ м/с².

Вычислительные эксперименты выполнялись с использованием ПО MathWorks MATLAB.

Результаты. На рисунках 3–4 представлены результаты математического моделирования полета коптера при значениях аргументов функции Z^* :

$s = 0$ м, $p = 20$ м, $d = 0$ м, $k_0 = 0$ сек, $k_1 = 60$ сек, $k_2 = 180$ сек, $k_3 = 240$ сек,

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \end{bmatrix}, \text{ т.е. предполагается, что}$$

на величину Z оказывает влияние случайная сила R_C – «белый» гауссовый шум с нулевым математическим ожиданием и диапазоном случайных величин $-3 \dots 3$ (так как элемент матрицы $Q_{1,1} = 1$). На рисунках 3-а, 3-б, 3-в приведены результаты моделирования при $R = 0,1$, на рисунках 4-а, 4-б, 4-в – при $R = 10$.

Рисунки 3-а, 3-б, 3-в демонстрируют значительное отклонение координаты Z коптера от требуемых значений координаты Z^* при наборе коптером высоты. На рисунках 4-а, 4-в, напротив, показана минимальная ошибка Z_E вертикальной координаты коптера вследствие значения дисперсии R , характеризующей величину шума измерения, большего значения элемента матрицы $Q_{1,1}$, характеризующего величину шума процесса для величины Z , то есть $R > Q_{1,1}$. Наблюдатель состояния с данным соотношением дисперсий может быть применен при использовании в системе управления коптером датчика высоты с относительно высокой погрешностью. С другой стороны, при $R \gg Q$, происходит чрезмерное «сглаживание» оценок значений переменных состояния системы, и, как следствие этого, их искажение.

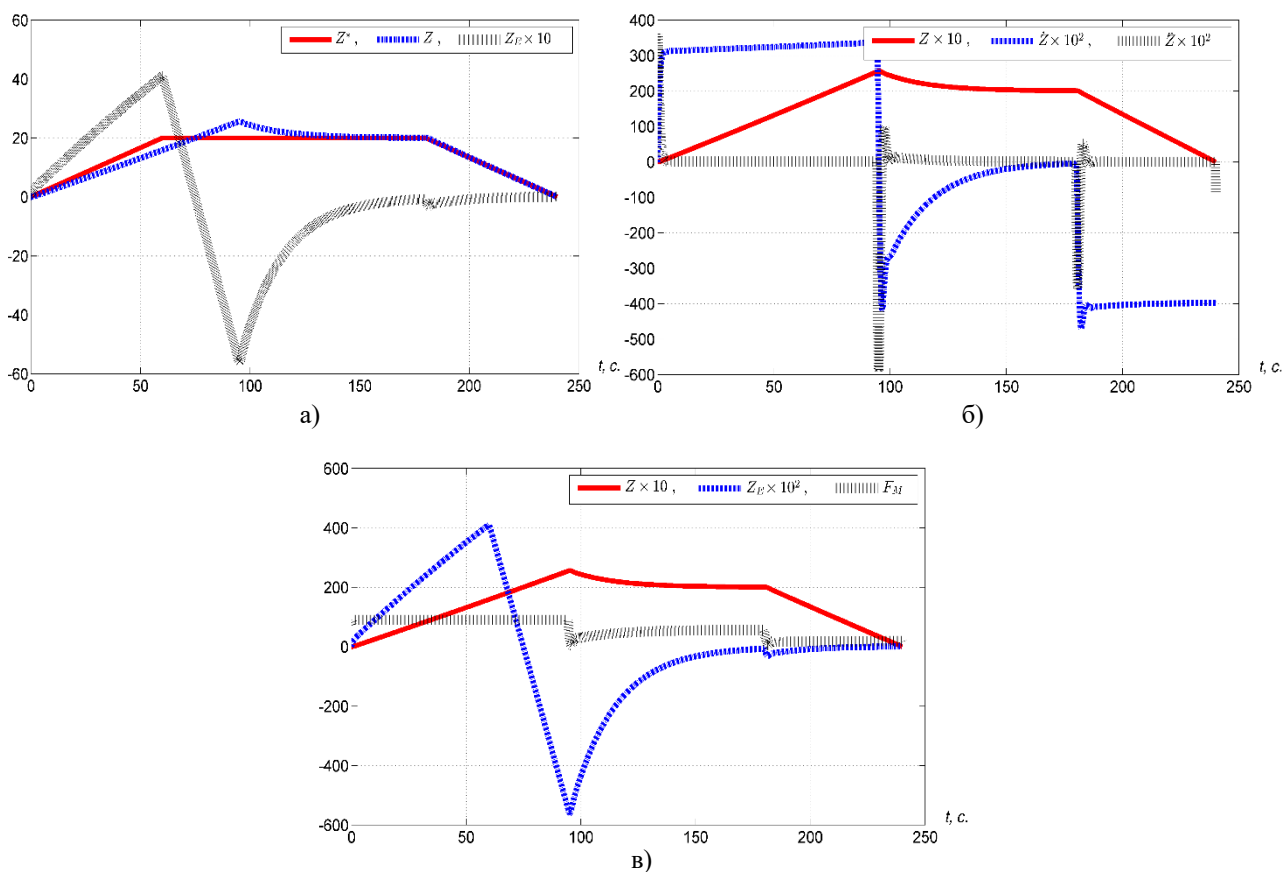


Рис. 3. Временные диаграммы изменения значений: а – Z^* , Z , Z_E , б – Z , $\dot{Z}$, $\ddot{Z}$, в – Z , Z_E , F_M

Проведено исследование влияния максимальной подъемной силы F_{MAX} одного привода на диапазон изменения подъемной силы F_M коптера – результаты представлены на рис. 5.

Рисунок 5 демонстрирует временные диаграммы изменения подъемной силы F_M коптера при разных значениях максимальной подъемной силы одного привода F_{MAX} и при значениях аргументов функции Z^* : $s = 0$ м, $p = 1$ м, $d = 0$ м, k_0

$= 0$ сек, $k_1 = 3$ сек, $k_2 = 9$ сек, $k_3 = 12$ сек, на величину Z сила R_C не оказывала влияние. Временные диаграммы 1 и 2 (рис. 5) дают информацию о недостаточной тяговооруженности для вертикального полета коптера; с другой стороны, временные диаграммы 3 и 4 позволяют говорить о достаточных возможностях приводов для взлета.

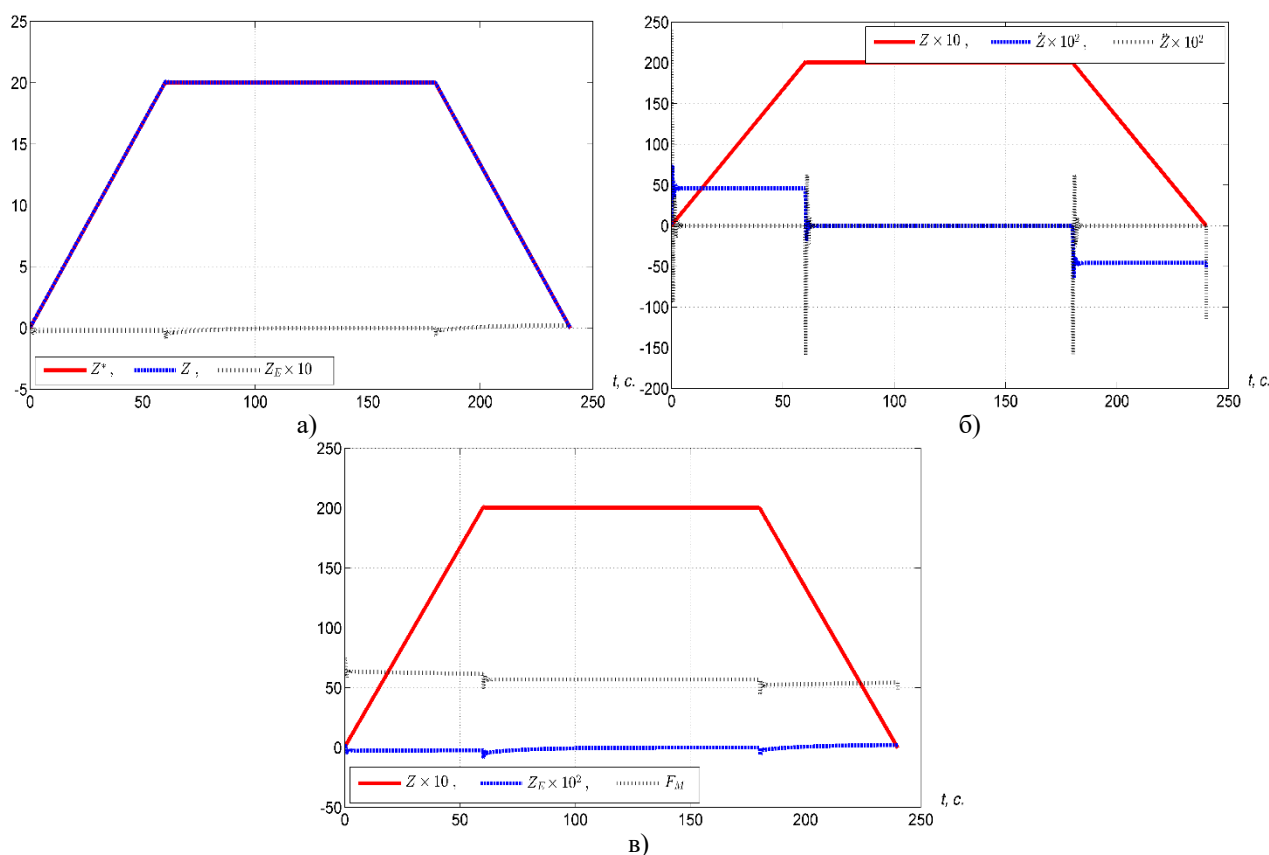


Рис. 4. Временные диаграммы изменения значений: а – Z^* , Z , Z_E , б – Z , $\dot{Z}$, $\ddot{Z}$, в – Z , Z_E , F_M

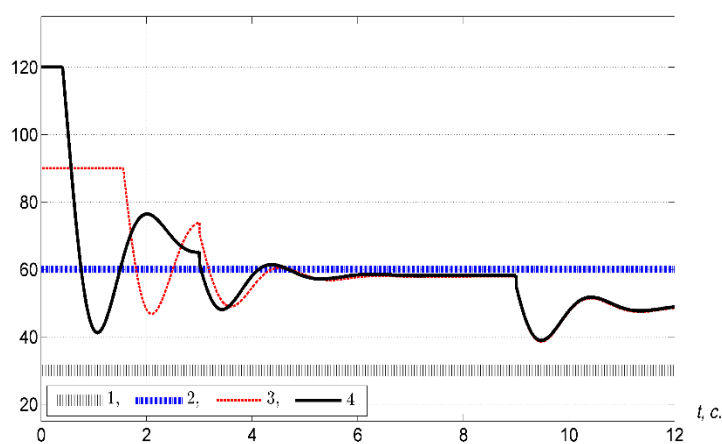


Рис. 5. Временные диаграммы изменения подъемной силы F_M коптера при значениях F_{max} :
1 – $F_{max} = 5$ Н, 2 – $F_{max} = 10$ Н, 3 – $F_{max} = 15$ Н, 4 – $F_{max} = 20$ Н

Выводы. Предложена математическая модель привязной летательной платформы (NTFP), описывающая процесс взлета/посадки коптера с учетом влияния случайных возмущений атмосферы на высоту полета коптера.

Математическая модель полета привязной платформы, описанная в пространстве состояний, может быть использована для построения наблюдателей состояния подобных устройств на основе расширенного фильтра Калмана. Фильтр Калмана, используемый при математическом моделировании полета привязной платформы, позволяет получить оценку переменных состояния

данного летательного аппарата и учитывать случайные возмущения атмосферы как частично детерминированной среды с целью уменьшения ошибки позиционирования привязной платформы во время управления ею.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишневский В.М., Козырев Д.В., Рыков В.В., Нгуен З.Ф. Моделирование надёжности беспилотного высотного модуля привязной телекоммуникационной платформы // Информационные технологии и вычислительные системы.

2020. № 4. С. 26–38. DOI: 10.14357/20718632200403

2. Паршин А.В., Цирель В.С., Ржевская А.К. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки с применением БПЛА // Проблемы геокосмоса. 2018. С. 190–195.

3. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Unleashing the potential of networked tethered flying platforms: Prospects, challenges, and applications // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2022. Vol. 3. Pp. 278–320. DOI: 10.1109/OJVT.2022.3177946

4. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. On the Usage of Networked Tethered Flying Platforms for Massive Events-Case Study: Hajj Pilgrimage // arXiv preprint arXiv:2111.00900. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.00900

5. Lou Z., Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. HAPS in the non-terrestrial network nexus: Prospective architectures and performance insights // IEEE Wireless Communications. 2023. Vol. 6(30). Pp. 52–58. DOI: 10.1109/MWC.004.2300198

6. Kanoria A.A., Pant R.S. Winged aerostat systems for better station keeping for aerial surveillance // International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (CMAE 2011). Advanced Materials Research. 2011. Vol. 433–440. Pp. 6871–6879. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.6871

7. Khoury G.A., Gillett J.D. Airship Technology. Cambridge Aerospace Series, 2004. 560 p.

8. Rajani A., Pant R.S., Sudhakar K. Dynamic Stability Analysis of a Tethered Aerostat // AIAA Journal of Aircraft. 2010. Vol. 47(5). Pp. 1531–1538. DOI: 10.2514/1.47010

9. Lambert C., Nahon M. Stability Analysis of a Tethered Aerostat // Journal of Aircraft. 2003. Vol. 40(4). Pp. 705–715. DOI: 10.2514/2.3149

10. Vishnevsky V.M., Mikhailov E.A., Tumchenok D.A. et al. Mathematical Model of the Operation of a Tethered Unmanned Platform under Wind Loading // Mathematical Models and Computer Simulations. 2020. Vol. 12. Pp. 492–502. DOI: 10.1134/S2070048220040201

11. Kiribayashi S., Ashizawa J., Nagatani K. Modeling and design of tether powered multicopter // Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 2015. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/SSRR.2015.7443016

12. Kwon H-M, Lee D-K. Modeling and Simulation of Heavy-Lift Tethered Multicopter Considering Mechanical Properties of Electric Power Cable // Aerospace. 2021. Vol. 8(8). 208. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/aerospace8080208

13. Павловский М.А., Акинфеева Л.Ю., Бойчук О.Ф. Теоретическая механика: Динамика // Киев: Вища школа. 1990. 480 с.

14. Ляпунов А.М. Лекции по теоретической механике. Киев: Наукова думка. 1982. 632 с.

15. Jatsun S., Emelyanova O., Lushnikov B., Leon A.M., Morocho L.M., Pechurin A., Sarmiento C.N. Hovering control algorithm validation for a mobile platform using an experimental test bench // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1027. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/1027/1/012008

16. Zaid A.A., Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Aerial-Aided mmWave VANETs Using NOMA: Performance Analysis, Comparison, and Insights // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2024. Vol. 73 (4). Pp. 4742–4758. DOI: 10.1109/TVT.2023.3330306

17. Dinh T.D., Vishnevsky V., Larionov A., Vybornova A., Kirichek R. Structures and deployments of a flying network using tethered multicopters for emergencies // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol. 12563. DOI: 10.1007/978-3-030-66471-8_3

18. Alpago D., Dörfler F., Lygeros J. An extended Kalman filter for data-enabled predictive control // IEEE Control Systems Letters. 2020. Vol. 4 Pp. 994–999. DOI: 10.1109/LCSYS.2020.2998296

19. Sun H., Madonski R., Li S., Zhang Y., Xue W. Composite control design for systems with uncertainties and noise using combined extended state observer and Kalman filter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol. 69(4). Pp. 4119–4128. DOI: 10.1109/TIE.2021.3075838.

20. Schmidt S.F. Application of state-space methods to navigation problems // Advances in Control Systems, 1966. Vol. 3. Pp. 293–340. DOI: 10.1016/B978-1-4831-6716-9.50011-4

21. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана // Известия Юго-Западного государственного университета, 2019. №2. С. 53–64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64

Информация об авторах

Безмен Петр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Механика, мехатроника и робототехника». E-mail: pbezmen@yahoo.com. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Емельянова Оксана Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Механика, мехатроника и робототехника». E-mail: oks-emelyanova@yandex.ru. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика, мехатроника и робототехника». E-mail: teormeh@inbox.ru. Юго-Западный государственный университет. Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Поступила 02.05.2024 г.

© Безмен П.А., Емельянова О.В., Яцун С.Ф., 2024

***Bezmen P.A., Emelyanova O.V., Jatsun S.F.**

Southwest State University

*E-mail: pbezmen@yahoo.com

MATHEMATICAL MODELING OF A TETHERED PLATFORM'S CONTROLLED VERTICAL FLIGHT

Abstract. *There is a problem of quickly obtaining reliable and sufficient information about the environment, including in hard-to-reach areas where there is no communication or long-term stationary monitoring is required in order to ensure the safety or security of important objects. The paper discusses the issues of mathematical modeling of automated cable parking of an unmanned aerial vehicle (platform) in a vertical plane.*

The aim of the research is to create tools for the design of tethered flying platforms equipped with an automated cable restraint system, taking into account external random atmospheric disturbances during vertical flight. To achieve this aim, it is necessary to carry out mathematical modeling of the flight of tethered unmanned aerial platforms, taking into account external active and reactive forces, as well as disturbing forces – random air flows, which can be significant in strength and variable in direction, which undoubtedly affects the stable position tethered platform. The use of the extended Kalman filter algorithm as an observer of the tethered flying platform state in mathematical modeling of the platform's flight makes it possible to take into account random disturbances of the atmosphere as a partially deterministic environment in order to reduce the position error of the aircraft during its control.

To solve the problem, methods of classical mechanics, motion stability theory, optimal control, estimation theory, and parametric optimization were used.

The results of mathematical modeling of a tethered flying platform – a tethered copter – flight are presented, taking into account random atmospheric disturbances. The results of computational experiments made it possible to establish that random atmospheric disturbances can have a significant impact on the position control of an aircraft.

Keywords: *tethered platform, modeling, Kalman filter, state observer.*

REFERENCES

1. Vishnevsky V.M., Kozyrev D.V., Rykov V.V., Nguyen Z.F. Modeling the reliability of an unmanned high-altitude module of a tethered telecommunications platform [Modelirovaniye nadozhnosti bespilotnogo vysotnogo modulya privyaznoy telekommunikatsionnoy platformy]. Information technologies and computing systems. 2020. No. 4. Pp. 26–38. DOI: 10.14357/20718632200403 (rus)
2. Parshin A.V., Tsirel V.S., Rzhetskaya A.K., Methodological recommendations for performing low-altitude aeromagnetic surveys using UAVs [Metodicheskiye rekomendatsii po vypolneniyu malovysotnoy aeromagnitnoy s"yemki s primeneni- yem BPLA]. Problems of geocosmos, 2018. Pp. 190–195. (rus)
3. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Unleashing the potential of networked tethered flying platforms: Prospects, challenges, and applications. IEEE Open Journal of Vehicular Technology. 2022. Vol. 3. Pp. 278–320. DOI: 10.1109/OJVT.2022.3177946
4. Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. On the Use of Networked Tethered Flying Platforms for Massive Events-Case Study: Hajj Pilgrimage. arXiv preprint arXiv:2111.00900. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.00900
5. Lou Z., Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. HAPS in the non-terrestrial network nexus: Prospective architectures and performance insights. IEEE Wireless Communications. 2023. Vol. 6(30). Pp. 52–58. DOI: 10.1109/MWC.004.2300198
6. Kanoria A.A., Pant R.S. Winged aerostat systems for better station keeping for aerial surveillance. International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (CMAE 2011). Advanced Materials Research. 2011. Vol. 433–440. Pp. 6871–6879. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.6871
7. Khoury G.A., Gillett J.D. Airship Technology. Cambridge Aerospace Series, 2004. 560 p.
8. Rajani A., Pant R.S., Sudhakar K. Dynamic Stability Analysis of a Tethered Aerostat. AIAA

Journal of Aircraft. 2010. Vol. 47(5). Pp. 1531–1538. DOI: 10.2514/1.47010.

9. Lambert C., Nahon M. Stability Analysis of a Tethered Aerostat. Journal of Aircraft. 2003. Vol. 40(4). Pp. 705–715. DOI: 10.2514/2.3149

10. Vishnevsky V.M., Mikhailov E.A., Tumchenok D.A. et al. Mathematical Model of the Operation of a Tethered Unmanned Platform under Wind Loading. Mathematical Models and Computer Simulations. 2020. Vol. 12. Pp. 492–502. DOI: 10.1134/S2070048220040201

11. Kiribayashi S., Ashizawa J., Nagatani K. Modeling and design of tether powered multicopter. Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 2015. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/SSRR.2015.7443016.

12. Kwon H-M, Lee D-K. Modeling and Simulation of Heavy-Lift Tethered Multicopter Considering Mechanical Properties of Electric Power Cable. Aerospace. 2021. Vol. 8(8). 208. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/aerospace8080208

13. Pavlovsky M.A., Akinfieva L.Yu., Boychuk O.F. Theoretical mechanics: Dynamics [Teoreticheskaya mekhanika: Dinamika]. Kiev: Vyshcha shkola, 1990, 480 p. (rus)

14. Lyapunov A.M., Lectures on theoretical mechanics [Lektsii po teoreticheskoy mekhanike]. Kiev: Naukova dumka, 1982. p. 632. (rus)

15. Jatsun S., Emelyanova O., Lushnikov B., Leon A.M., Morocho L.M., Pechurin A., Sarmiento C.N. Hovering control algorithm validation for a mobile platform using an experimental test bench. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1027. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/1027/1/012008

16. Zaid A.A., Belmekki B.E.Y., Alouini M.S. Aerial-Aided mmWave VANETs Using NOMA: Performance Analysis, Comparison, and Insights. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2024. Vol. 73 (4). Pp. 4742–4758. DOI: 10.1109/TVT.2023.3330306

17. Dinh T.D., Vishnevsky V., Larionov A., Vybornova A., Kirichek R. Structures and deployments of a flying network using tethered multicopters for emergencies. Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol. 12563. DOI: 10.1007/978-3-030-66471-8_3

18. Alpagó D., Dörfler F., Lygeros J. An extended Kalman filter for data-enabled predictive control. IEEE Control Systems Letters/ 2020. Vol. 4. Pp. 994–999. DOI: 10.1109/LCSYS.2020.2998296.

19. Sun H., Madonski R., Li S., Zhang Y., Xue W. Composite control design for systems with uncertainties and noise using combined extended state observer and Kalman filter. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol. 69(4). Pp. 4119–4128. DOI: 10.1109/TIE.2021.3075838

20. Schmidt S.F. Application of state-space methods to navigation problems. Advances in Control Systems, 1966. Vol. 3. Pp. 293–340. DOI: 10.1016/B978-1-4831-6716-9.50011-4

21. Bezmen P.A. Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter [Kompleksirovaniye dannykh sistemy upravleniya mobil'nyy robotom s ispol'zovaniyem rasshirennogo fil'tra Kalmana]. Proceedings of the Southwest State University, 2019. No. 2. Pp. 53–64. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-53-64 (rus)

Information about the authors

Bezmen, Petr A. PhD, Assistant professor. E-mail: pbezmen@yahoo.com. Southwest State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Emelyanova, Oksana V. PhD, Assistant professor. E-mail: oks-emelyanova@yandex.ru. Southwest State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Jatsun, Sergey F. DSc, Professor. E-mail: teormeh@inbox.ru. Southwest State University. Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Received 02.05.2024

Для цитирования:

Безмен П.А., Емельянова О.В., Яцун С.Ф. Математическое моделирование управляемого вертикального полета привязной платформы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №7. С. 111–121. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-111-121

For citation:

Bezmen P.A., Emelyanova O.V., Jatsun S.F. Mathematical modeling of a tethered platform's controlled vertical flight. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 7. Pp. 111–121. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-7-111-121