

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

12

2022

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

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

№ 12, 2022 год

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

Vol. 12. 2022

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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 Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 724/4 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	16.12.2022
Выход в свет	21.12.2022

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,56. Уч.-изд. л. 16,67. Тираж 40 экз. Заказ № 146

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

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 724/4
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	16.12.2022

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Павлович Ненад, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш).

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., и.о. директора Высшей школы архитектуры и дизайна, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Фишер Ханс-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 сопровитвления материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Margarita V. Per'kova, Doctor of Architecture, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russian Federation, Belgorod).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Нелюбова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Боцман Л.Н., Шаповалов Н.А. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТА С МОДИФИКАТОРАМИ ДЛЯ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ	8
Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Кочерженко В.В. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СМЯТИЯ И СДВИГА В БОЛТОСВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ	18
Наумов А.Е., Юдин Д.А., Долженко А.В., Прахова А.А., Кучеренко А.С. ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ	28
Малявина Е.Г., Ландырев С.С. ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ НОРМ К ВНУТРЕННЕМУ МИКРОКЛИМАТУ УГЛОВОГО ПОМЕЩЕНИЯ	39
Шамаева Т.В. УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОБЛИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА	46
Перцев В.В., Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю., Пампушенко А.Ю. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖИЛИЩНОГО ФОНДА ПЕРВЫХ МАССОВЫХ СЕРИЙ ЗАСТРОЙКИ ГОРОДА БЕЛГОРОДА	62
Супранович В.М., Сафронова А.Д. ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННОГО ОБЛИКА ЗДАНИЙ МУСОРОСОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ В КОНТЕКСТЕ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ	75

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А. РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ТЕРМОСТОЙКОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРОБИ ГИДРИДА ТИТАНА	86
Романенко А.А., Бузов А.А., Чуев В.П., Дороганов В.А., Онищук В.И., Фанина Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФТОРСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА	94

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОЛЕСА ТРАНСПОРТНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ	114
Марусич К.В., Дружинин В.И. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МОБИЛЬНОГО РАСТОЧНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	124

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Nelyubova V.V., Usikov S.A., Netsvet D.D., Botsman L.N., Shapovalov N.A. PREDICTING THE STRENGTH OF CEMENT STONE WITH MODIFIERS FOR SELF-COMPACTING CONCRETE	8
Solodov N.V., Vodyahin N.V., Kocherzhenko V.V. STRESS-STRAIN STATE AS THE IMPLEMENTATION OF COLLAPSE AND SHEAR IN A BOLTED-WELDED JOINT	18
Naumov A.E., Yudin D.A., Dolzhenko A.V., Prakhova A.A., Kucherenko A.S. INTELLECTUALIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CONSTRUCTION AND TECHNICAL EXPERTISE	28
Malyavina E.G., Landyrev S.S. VERIFICATION OF COMPLIANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE NORMS FOR THE INTERNAL MICROCLIMATE OF A CORNER ROOM	39
Shamaeva T.V. SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURAL APPEARANCE OF INDUSTRIAL FACILITIES ON THE EXAMPLE OF FOREIGN EXPERIENCE	46
Percev V.V., Ladik E.I., Drebezgova M.Y., Pampushenko A.Y. FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE HOUSING FUND OF THE FIRST MASS DEVELOPMENT SERIES IN THE CITY OF BELGOROD	62
Supranovich V.M., Safronova A.D. PRINCIPLES OF FORMATION OF ARCHITECTURAL AND ART SHAPE OF WASTE SORTING PLANT IN THE CONTEXT OF THE URBAN ENVIRONMENT	75

CHEMICAL TECHNOLOGY

Yastrebinsky R.N., Karnaukhov A.A., Pavlenko V.I., Gorodov A.I., Akimenko A.V., Fanina E.A. RADIATION-PROTECTIVE CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE BASED ON A HEAT-RESISTANT MODIFIED FRACTION OF TITANIUM HYDRIDE	86
Romanenko A.A., Buzov A.A., Chuev V.P., Doroganov V.A., Onishchuk V.I., Fanina E.A. RESEARCH OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON ALUMINOFLUROSILICATE GLASS	94

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Shabanov D.V., Volkov A.N., Cheusova A.I., Kochneva O.V. ESTIMATING THE LATERAL FORCES THAT IMPACT ON THE WHEELS OF A TRANSPORT ROBOTIC SYSTEM	114
Marusich K.V., Druzhinin V.I. DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF A MOBILE BORING MACHINE FOR PROCESSING INTERNAL SURFACES	124

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17

Нелубова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Боцман Л.Н., Шаповалов Н.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: nelubova@list.ru*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТА С МОДИФИКАТОРАМИ ДЛЯ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ

Аннотация. *Современные требования к качеству конструкционных строительных материалов обуславливают потребность в разработке высокоэффективных долговечных композитов на основе цементного вяжущего. Получение таких материалов подразумевает применение добавок и модификаторов, повышающих прочностные характеристики бетонов и снижающих производственные браки за счет стабилизации структуры и свойств изделий. В работе в качестве модифицирующих компонентов смеси выступали добавки производства ЗАО «НП ЦМИД» (г. Санкт-Петербург): минеральный порошок – многокомпонентная комплексная порошкообразная добавка для бетона – ГПМ модификации 9/12-3, гиперпластификатор ГПМж-Ультра, модификация 17/1.*

Целью работы являлось изучение влияния добавок на прочность материала и определение значений прогнозируемой прочности в отдаленный период эксплуатации.

Показано, что введение добавок не влияет на характер набора прочности, но приводит к снижению прочности на сжатие на 13 % для минерального порошка и повышению на 11 % для минерального порошка и пластификатора. Наблюдается снижение количества воды затворения, необходимое для достижения нормальной густоты.

Значения расчетной прочности сопоставимы с полученными данными значений прочности: для всех составов характерен рост прочности до 100 суток твердения с последующим затуханием набора прочности.

Таким образом, установлены закономерности влияния добавок на прогнозируемые значения марочной прочности вяжущего: наблюдается увеличение начальной скорости твердения и снижение коэффициента торможения процессов гидратации вяжущего при совместном введении минерального порошка и пластификатора. Высокие показатели прочности вяжущего позволяют прогнозировать высокие эксплуатационные характеристики материалов на его основе.

Ключевые слова: *самоуплотняющийся бетон, модификатор, карбонатно-кремнеземная добавка, пластификатор, долговечность.*

Введение. Строительство современных зданий и сооружений требует применения высокоэффективных долговечных материалов, соответствующих требованиям действующих нормативных документов. Особое внимание в последние годы уделяется разработке составов самоуплотняющихся бетонов, обладающих высокими показателями по прочности, подвижности смеси, ее стойкости к расслоению при сниженном объеме воды затворения [1–9]. Данные характеристики возможно получить применением пластифицирующих добавок и модификаторов рационально подобранного состава и концентрации [10–15].

Применение добавок и модификаторов при производстве бетонных изделий в наши дни является неотъемлемой частью технологического процесса. Подбор типа и дозировки добавок, способ введения в смесь – одни из важных этапов проектирования составов высокоэффективного композита, отвечающего требованиям современных нормативных документов и запросам отрасли и специалистов.

Применение добавок и модификаторов позволяет повысить качество материала и его долговечность: уже сегодня существуют составы высоко- и ультравысокопрочных бетонов, которые внедрены в технологии производства на предприятиях [16–23].

Среди специальных видов бетонов выделяются самоуплотняющиеся, характеризующиеся высокой подвижностью смесей при низком расходе воды как основной дисперсионной среды, что достигается комплексным подбором состава из множества компонентов при использовании высокоэффективных пластификаторов [18–20]. Рациональный подбор видового состава компонентов и их соотношения обеспечивает формирование плотной упаковки частиц, что, в совокупности с низкой водопотребностью смеси, препятствует ее расслоению на всех технологических этапах и формирует бетон с высокой прочностью без перерасхода цемента как основного связующего компонента.

Однако замена части цемента на активные дисперсные компоненты ставит задачи по оценке

долговечности материалов с их использованием. Оценка долговечности в натуральных условиях представляет собой длительный процесс исследований изменения свойств материалов под действием внешних агрессивных факторов. Решением обозначенной проблемы является использование современных математических методов, позволяющих осуществлять прогнозную оценку потенциального изменения свойств материалов во времени с учетом установленных кинетических закономерностей коррозионных процессов [24, 25].

В данной работе рассматривается изменение прочности во времени цементного вяжущего с добавкой минерального порошка и пластификатора. Как было показано в ранее выполненных исследованиях, введение указанных компонентов позволяет улучшить физико-механические характеристики материала [26]. В частности, достигается получение смесей с высокой подвижностью и низким водоотделением, сохранением свойств во времени, но при этом отвечающим требованиям нормативных документов.

Материалы и методы. В качестве вяжущего в работе был использован портландцемент

марки ЦЕМ I 42,5Н производства ЦЗ «Пролетарий» (г. Новороссийск). В качестве добавок использовали материалы производства ЗАО «НП ЦМИД» (г. Санкт-Петербург): многокомпонентные комплексные порошкообразные добавки для бетона – ГПМ (модификации 18/1 и 9/12-3) – тонкодисперсные смеси на основе солей полиметиленафталинсульфонатов, диоксида кремния и карбонатов (химический состав представлен в таблице 1); гиперпластификатор ГПМж-Ультра (модификация 17/1). Эффективность использования данных компонентов для получения высокопрочного самоуплотняющегося бетона доказана авторским коллективом ранее [26]. Минеральные порошки представляют собой полидисперсные системы с разбросом размеров частиц в диапазоне 0–100 мкм с преобладанием частиц до 10 мкм. Гиперпластификатор ГПМж-Ультра выпускается в жидком виде и представляет собой высокоэффективную комплексную добавку, применяемую для повышения пластичности, снижения усадки и ползучести бетонных смесей, повышения их прочности и морозостойкости.

Таблица 1

Химический состав многокомпонентных комплексных порошкообразных добавок для бетона ГПМ

Тип добавки	Оксиды, %									
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	П.п.п.
18/1	39,3	31,1	12,1	8,5	0,2	4,2	2,1	1,5	0,58	0,42
9/12-3	55,6	21,3	9,8	4,9	2,8	2,2	2,1	0,3	0,26	0,74

Эффективность модификаторов подтверждали анализом активности добавок, определяемой количеством кислотных брэнстедовских центров адсорбции и количеством поглощенного СаО из раствора. Оценку кислотных свойств, исследуемых образцов проводили индикаторным способом. Данная методика основана на адсорбции одноосновных индикаторов на поверхности твердых частиц в водной среде [27–29], это приводит к изменению окраски индикаторов, которая в свою очередь позволяет определить величину кислотности (основности) анализируемой поверхности. Оптическую плотность растворов для количественного определения центров адсорбции измеряли спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовой и видимой областях спектра с помощью спектрофотометра LEKI SS1207. Оценку сорбционной емкости модификаторов, основанной на определении способности анализируемых проб поглощать из водного раствора гидроксид кальция, проводили титриметрическим способом по методу И.Д. Запорожца [30].

Подготовку образцов производили по ГОСТ 30744-2001. Прочность на сжатие и изгиб определяли согласно ГОСТ 310.4-81.

Основная часть. На первоначальном этапе осуществляли оценку активности порошкообразных добавок, применяемых в работе в качестве компонента для получения самоуплотняющегося бетона. Согласно полученным данным, модификатор серии 9/12-3 отличается несколько повышенной суммарной активностью (рис. 1, а). Так, при сопоставимой концентрации кислотных центров Брэнстеда (отличия не превышает 10 %), модификатор обозначенной серии характеризуется увеличенной в 1,5 раза сорбционной емкостью веществ, определяемых количеством поглощенного СаО: к 3 суткам общее количество поглощенного СаО для порошкообразных модификаторов ГПМ 18/1 и 9/12-3 составляет 34 и 47 мг/г соответственно. Эти данные хорошо коррелируют с изменением концентрации свободного СаО в растворе во времени (рис. 1, б). Так, в случае модифицирующего компонента ГПМ 18/1 в

первые три часа практически не происходит изменения концентрации СаО. Поглощение начинается в период с 3 до 5 часов, при этом концентрация равномерно снижается до 1 г/л. В случае порошка для модификации 9/12-3 имеет место скачкообразное изменение концентрации СаО в известковом растворе. Так, в первый час концентрация падает почти в 1,5 раза (с изначальной 1,47 г/л до 1 г/л). При этом к 3 часам выдержки порошка в растворе часть поглощенного свобод-

ного вещества возвращается в раствор (в пределах 20 % от поглощенного). Тем не менее, несмотря на колебания в процессах поглощения и отдачи свободного СаО, сорбционная емкость данного порошка выше. Вероятным объяснением такой специфики модификатора серии 9/12-3 является увеличенное содержание карбонатных компонентов в его составе (табл. 1), характеризующихся высокой гигроскопичностью и, соответственно, поглощающей способностью.

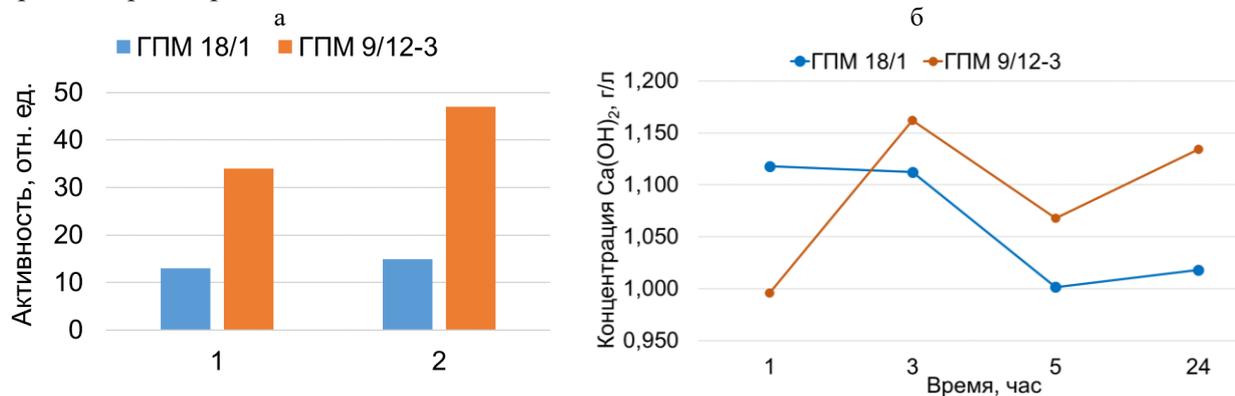


Рис. 1. Активность (а) и поглощение СаО из раствора (б) во времени порошковых компонентов самоуплотняющихся бетонов:

1 – кислотные брэнстедовские центры, 10^3 моль/г;

2 – количество поглощенного СаО из раствора по методу Запорожца, мг/г

В результате по совокупности данных, характеризующих активность порошкообразных минеральных модификаторов, установлено, что в составе цементного теста в качестве активной добавки целесообразно использовать модификатор серии ГПМ 9/12-3.

В работе были изучены следующие составы (табл. 1) [23]:

1. Цемент без добавки (состав 1 – контроль);
2. Цемент + 12,5 % минерального порошка от массы цемента (пор 9/12-3) (состав 2);
3. Цемент + 12,5 % минерального порошка от массы цемента (пор 9/12-3) + 3 % пластификатора ГПМж 17/1 от массы цемента (состав 3).

Следует отметить, что минеральный порошок используется взамен части цемента.

Для указанных выше составов была определена нормальная плотность цементного теста. По представленным в таблице 2 результатам видно, что введение минерального порошка приводит к росту водоцементного отношения (с В/Ц=0,255 до В/Ц=0,286), требуемого для получения теста нормальной плотности, за счет снижения доли цемента в составе. Однако общее количество воды затворения, вводимое в систему, остается неизменным. В результате формируется система с повышенным расходом воды по отношению к цементу, что может негативно сказаться на конечной прочности цементного камня с модификато-

ром. Данный факт отражен в полученных результатах и на графике (рис. 2). При введении пластификатора водотвердое отношение снижается на 36 % (с В/Т=0,255 до В/Т=0,163). Таким образом, обеспечивается возможность сокращения количества воды затворения при сохранении подвижности и удобоукладываемости смеси. Водотвердое отношение у состава 3 по сравнению с составом 2 снижается на 36 %, а по сравнению с составом 1 – на 28 %.

На основании полученных значений В/Т были рассчитаны составы и заформованы образцы-балочки (40×40×160 мм) для определения прочностных характеристик материалов. Для исследуемых составов была изучена кинетика набора прочности (рис. 2).

Твердение образцов проходило по ГОСТ 30744-2001. Определение прочности производили на 1, 3, 7, 14 и 28 суток.

Введение модификаторов не влияет на характер зависимости кинетики набора прочности: наблюдается плавный рост с достижением к 7 суткам 70 % прочности с последующим замедлением процессов. Так, уже к 3 суткам отмечаются различия в значениях прочности цементного камня: камень, полученный с использованием минерального порошка в совокупности с пластификатором, характеризуется повышенной прочностью (на 16 %). Указанная особенность сохраняется при твердении камня вплоть до 28 суток.

Введение минерального порошка приводит к снижению прочности материала на 13 % по сравнению с контролем (цемент без использования добавок). Данный факт можно объяснить «раз-

бавлением» твердой фазы инертным компонентом, то есть снижением концентрации в системе цемента, обеспечивающего высокие значения прочности.

Таблица 2

Состав и свойства цементного камня с модификаторами

№ состава п/п	Состав			В/Т	Нормальная густота (В/Ц)	Предел прочности при изгибе на 28 сутки, МПа	Предел прочности при сжатии на 28 сутки, МПа
	Цемент	Минеральный порошок*	Пластификатор*				
1	+	-	-	0,26	0,255	7,9	101,3
2	+	+	-	0,26	0,286	6,6	87,9
3	+	+	+	0,16	0,183	20,8	112,2

*процент от массы цемента

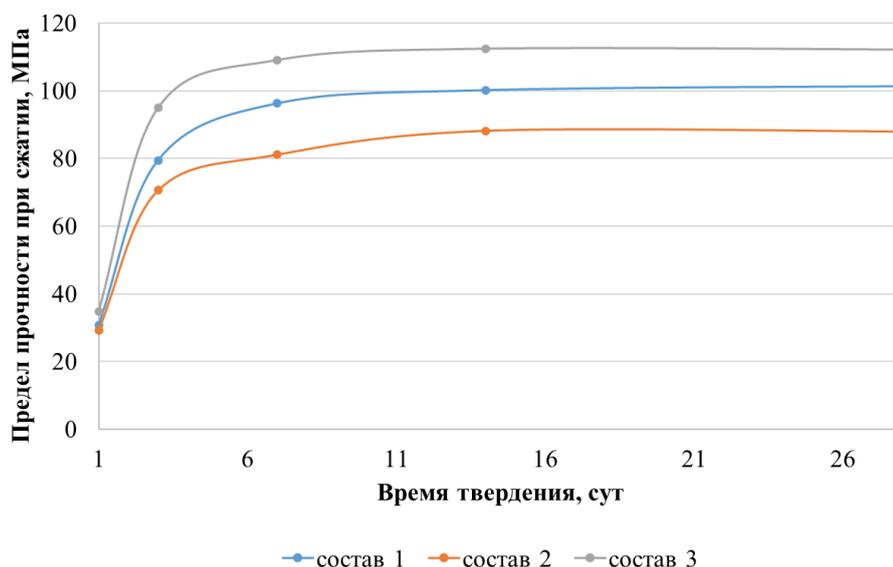


Рис. 2. Кинетика набора прочности цементного камня в присутствии модификаторов

Совместное введение минерального порошка и пластификатора приводит к росту прочности на 11 % к концу срока твердения: за счет действия пластификатора обеспечивается равномерное обволакивание частиц цемента водой (химический фактор), при этом минеральный порошок способствует предотвращению их коагуляции (механический фактор) и обеспечивает формирование плотнейшей упаковки частиц твердой фазы, состоящей как из частиц цемента, так и составляющих модификатора. Таким образом, комплексное совместное действие добавок обеспечивает структурную стабильность цементного теста, что обуславливает формирование максимально бездефектной структуры цементного камня в последующем.

Для эффективного внедрения данных материалов в строительство важно обеспечить не

только прочностные характеристики, но и долговечность — способность сопротивляться комплексному действию атмосферных и других факторов в условиях эксплуатации и сохранять на допустимом уровне структурные параметры, сложившиеся в технологический период.

Для анализа прочностных характеристик в отдаленный период был произведен расчет по методике Ш.М. Рахимбаева [24, 25]. Методика основана на расчете начальной скорости процесса U_0 и коэффициентов торможения ($k_{\text{тор}}$) и корреляции ($k_{\text{кор}}$) по известным уравнениям теории переноса (уравнение 1, 2).

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_1 \sigma, \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)_0 + k_2 \tau, \quad (2)$$

τ – время гидратации, сут; σ – предел прочности при сжатии, МПа; $(\tau/\sigma)_0$ – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа; k_1 , k_2 – коэффициенты торможения процесса гидратации (твердения).

Уравнения выведены с учетом следующих гипотез: процесс начинается с максимальной скоростью U_0 (МПа/сут), определяемой потенциальной реакционной способностью системы в представленных условиях. Физический смысл начальной скорости твердения – прочность материала через сутки твердения. Далее идет торможение, скорость процесса стремится к нулю. В случае цементных систем замедление гидратации происходит в результате образования гидратных пленок на поверхности клинкерных минералов, что затрудняет диффузию воды и продуктов гидратации [24, 25].

Вычисления производились с помощью «Программы для расчета параметров кинетики твердения цементного камня и ряда других процессов», составленной Ш.М. Рахимбаевым.

Расчитанные данные приведены в таблице 3: введение минерального порошка совместно с пластификатором позволяет повысить начальную скорость процесса U_0 и снизить коэффициент торможения $k_{\text{тор}}$. Введение в систему минерального порошка без пластификатора приводит к обратному эффекту.

Для определения прогнозной прочности модифицированного вяжущего воспользуемся уравнением 3:

$$\sigma_i = \frac{iU_0}{1+iU_0} k_{\text{тор}}, \quad (3)$$

где i – время твердения, сут; U_0 – начальная скорость твердения; $k_{\text{тор}}$ – коэффициент торможения процесса гидратации (твердения).

Как известно, начальная скорость твердения отвечает за набор прочности в первые сутки твердения и ее повышение позволяет рационализировать технологический процесс за счет снижения временных затрат и ускорения периода оборота форм: материал набирает распалубочную прочность быстрее, за счет чего можно снизить период оборота форм. При этом снижение коэффициента торможения говорит о том, что процессы фазо- и структурообразования, набора прочности будут проходить в системе дольше и, таким образом, в отдаленный период прочность будет выше проектной.

Согласно полученным данным (табл. 3), введение дисперсного порошка незначительно снижает начальную скорость твердения цементного камня, что связано, вероятно, с частичным поглощением воды и незначительным замедлением гидратации цемента вследствие этого. Тогда как совместное использование порошкообразной добавки в комплексе с пластификатором обеспечивает формирование условий для ускоренной гидратации вследствие малого количества воды как дисперсионной среды в объеме цементного теста, следовательно, исключается образование сольватной оболочки вокруг цементных частиц. Это и выражается существенным увеличением начальной скорости твердения на 30 % по сравнению с бездобавочным составом.

Таблица 3

Результаты расчета по уравнениям теории переноса и расчетные прочности составов цементного камня с модификаторами в возрасте 28 суток

№ состава п/п	U_0	$K_{\text{тор}}$	$\sigma_{\text{расч}}^{28}$	$\sigma_{\text{эксп}}^{28}$	Отклонение Δ , МПа	Отклонение Δ , %
1	73,8	0,0093	102,208	101,31	-0,898	-0,88
2	72,41	0,0107	89,34	87,99	-1,35	-1,51
3	96,19	0,0084	114	112,17	-1,83	-1,61

Как видно из графического представления полученных данных (рис. 3), расчетные результаты сопоставимы с полученными экспериментальными: наибольшая прочность наблюдается у состава с совместным введением минерального порошка и пластификатора.

Для всех составов характерен рост прочности до 100 суток твердения с последующим затуханием набора прочности. При этом по сравнению с чистым цементом наблюдается снижение прочности на 13,1 % при введении минерального порошка и повышение прочности при введении суперпластификатора на 10,7 %, а также на

27,5 % по сравнению с составом с минеральным порошком. Несмотря на повышенное содержание воды в системе без пластифицирующей добавки, образцы с содержанием порошкообразного модификатора обеспечивают повышение прочности, что связано с реализацией двух факторов: физического – увеличение плотности упаковки твердой фазы ввиду существенно более высокой дисперсности модификатора; химического – пуццолановая реакция между портландитом, сформированным при гидратации цемента, и активным компонентом модифицирующей добавки.

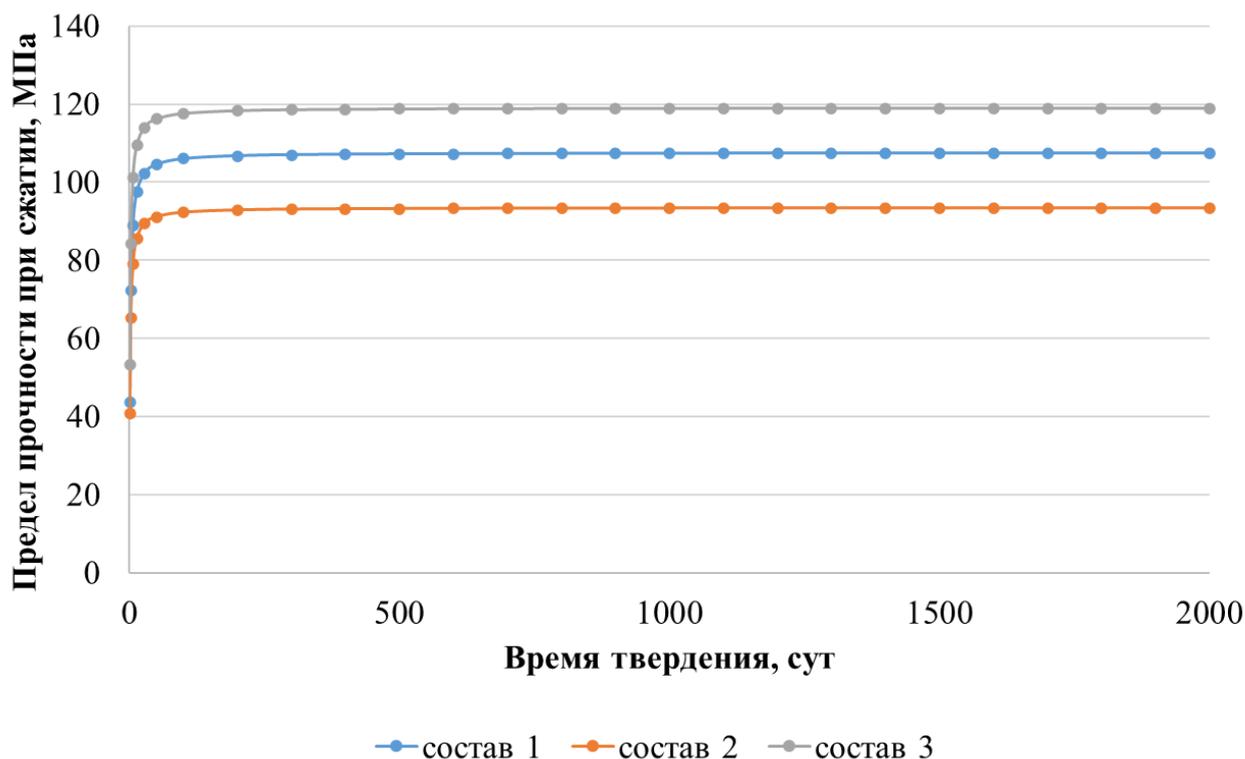


Рис. 3. Расчетная кинетика набора прочности цементного камня в зависимости от состава

Выводы. Таким образом, в работе показано влияние введения минерального порошка и пластификатора на прочностные характеристики в отдаленный период. Высокая эффективность модификаторов обеспечивается их физико-химической активностью.

Расчетная методика определения прочности материалов в отдаленный период эксплуатации основана на теории переноса. Согласно полученным результатам, совместное введение минерального порошка и пластификатора приводит к повышению прочности материала, увеличению начальной скорости процесса гидратации, снижению коэффициента торможения.

Высокие показатели прочности вяжущего позволяют прогнозировать высокие эксплуатационные характеристики материалов на его основе.

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зорин И.М., Плешко М.С. Концепция самоуплотняющегося бетона // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2. С. 31–34.
2. Городецкий И.Ю., Сердюченко В.М. Особенности использования самоуплотняющегося бетона // The Scientific Heritage. 2021. № 72–2 (72). С. 3–5. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-72-2-3-5.

3. Николенко Ю.В., Сташевская Н.А., Окольников Г.Э. Применение самоуплотняющихся бетонов в монолитном домостроении // Системные технологии. 2017. № 2(23). С. 38–42.

4. Рыжов И.Н., Романов А.Н. Самоуплотняющиеся бетонные смеси - производство и применение // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2008. № 1(2). С. 71–77.

5. Лесовик В.С., Дегтев Ю.В., Воронов В.В. Вяжущие для малых архитектурных форм из самоуплотняющихся бетонов // Вестник БГТ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 85–90.

6. Nandhini K., Karthikeyan J. A review on sustainable production of self-compacting concrete utilizing industrial by-products as cementitious materials // Innovative Infrastructure Solutions. 2022. Vol. 7. Iss. 3. 199. DOI: 10.1007/s41062-022-00792-1.

7. Faraj Rabar H., Mohammed Azad A., Omer Khalid M. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling / Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 501. Article number 104170. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104170.

8. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органоминеральных модификаторов на цементные системы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 1. С. 40–46.

9. Шаповалов Н.А., Ломаченко В.А., Яшуркаева Л.И., Яшуркаев О.В. Ячеистые бетоны с суперпластификатором СБ-3 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 2. С. 33–35.
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 58–63.
11. Несветаев Г.В. Технология самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 24–29.
12. Трошкина Е.А., Мухина К.С. Разработка составов и исследование свойств самоуплотняющихся бетонов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т. 2. С. 42–44.
13. Наруть В.В., Ларсен О.А., Самченко С.В., Александрова О.В., Булгаков Б.И. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16.
14. Степанова И.В., Шварц Ф.М. Высокопрочный самоуплотняющийся бетон // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 11 (1035). С. 37–39.
15. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4–6.
16. Пат. № 2679322, Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 24/26, С04В 18/24. Самоуплотняющийся бетон / Р.С. Федюк, П.Г. Козлов, С.Р. Кудряшов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДФУ). № 2018108644; заявл. 13.03.2018; опубл. 07.02.2019, Бюл. № 4. 6 с.
17. Пат. № 2659290, Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 28/08, С04В 24/26. Способ получения самоуплотняющегося бетона и бетонная смесь / А.В. Кравцов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия". № 2017112580; заявл. 12.04.2017; опубл. 29.06.2018, Бюл. № 19. 8 с.
18. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Арзуманов И.А., Чилин И.А. Новый национальный стандарт на самоуплотняющиеся бетонные смеси // Вестник НИЦ Строительство. 2021. № 3 (30). С. 30–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-3(30)-30-40.
19. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В., Кардумян Г.С., Ургапов В.И. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса "Федерация" // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 8. С. 20–22.
20. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28–30.
21. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77–85. DOI: 10.12737/article_5b4f02bf93df52.30110991.
22. Батудаева А.В., Кардумян Г.С., Каприелов С.С. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей // Бетон и железобетон. 2005. № 4. С. 14–18.
23. Ogurtsova Y.N., Netsvet D.D., Kuzmina N.O., Usikov S.A. Calculation of grade strength and durability of a cement binder with a nanostructured modifier // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Iss. 3. 032087. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032087.
24. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов // Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций. Белгород: Везелица. 1993. С. 8.
25. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытания // Строительные материалы. 1994. №4. С. 17–18.
26. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов // Строительные материалы. 2021. № 12. С. 48–54. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54.
27. Танабе К. Твердые кислоты и основания. М.: Мир, 1973. 156 с.
28. Кислотно-основные свойства поверхности твердых веществ: метод. указания. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1989. 23 с.
29. Захарова Н.В., Сычев М.М., Корсаков В.Г., Мякин С.В. Эволюция донорно-акцепторных центров поверхности сегнетоэлектриков при диспергировании // Конденсированные среды и межфазные границы. 2011. Т. 13. № 1. С. 56–62.
30. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1973. 504 с.

Информация об авторах

Нелюбова Виктория Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: nelubova@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Усиков Сергей Андреевич, аспирант кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: serjikk94@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Нецвет Дарья Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: netsvet_dd@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Боцман Лариса Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: lora80@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шаповалов Николай Афанасьевич, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной химии. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.04.2022 г.

© Нелюбова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Боцман Л.Н., Шаповалов Н.А., 2022

**Nelyubova V.V., Usikov S.A., Netsvet D.D., Botsman L.N., Shapovalov N.A.*

Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov

**E-mail: nelubova@list.ru*

PREDICTING THE STRENGTH OF CEMENT STONE WITH MODIFIERS FOR SELF-COMPACTING CONCRETE

Abstract. *Modern requirements for the quality of constructional building materials determine the need for the development of highly efficient durable composites based on cement binder. Obtaining such materials implies the use of additives and modifiers for increasing the strength characteristics of concrete and reduce production defects by stabilizing the structure and properties of products. In this research, additives produced by private company limited by shares "NP CMID" (Saint Petersburg, Russia) are used as modifying components of the mixture. They are mineral powder - a multicomponent complex powdered additive for concrete GPM modification 9/12, hyperplasticizer GPMZH-Ultra, modification 17/1. The purpose of this work is to study the effect of the introduction of additives on the strength of the material and to determine the values of the predicted strength in the long-term period of operation. It is demonstrated that the introduction of additives does not affect the character of the strength set. However, it leads to a decrease in the compressive strength by 13 % for mineral powder and an increase by 11 % for mineral powder and plasticizer. There is also a decrease in the amount of tempering water required to achieve standard consistency. The values of the calculated strength in the long-term period are comparable with the obtained data of strength values: all compositions are characterized by an increase in strength up to 100 days of hardening, followed by a damping of the strength set. Thus, the work established the regularities of the effect of additives on the predicted values of the brand strength of the binder: there is an increase in the initial hardening rate and a decrease in the inhibition coefficient of the hydration processes of the binder with the combined introduction of mineral powder and plasticizer. The high strength of the binder makes it possible to predict the high operational characteristics of materials based on it.*

Keywords: *self-compacting concrete, modifier, carbonate-silica additive, plasticizer, durability.*

REFERENCES

1. Zorin I.M., Pleshko M.S. Concept of self-compacting concrete [Konceptiya samouplotnyayushchegosya betona]. Proceedings of the rostov state transport university. 2019. No. 2. Pp. 31–34. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-72-2-3-5. (rus)

2. Gorodetsky I.Yu., Serdyuchenko V.M. Features of using self-compacting concrete [Osobennosti ispol'zovaniya samouplotnyayushchegosya betona]. The Scientific Heritage. 2021. No. 72–2 (72). Pp. 3–5. (rus)

3. Nikolenko Yu.V., Stashevskaya N.A., Okol'nikova G.E. Application of SCC in the mono-

lithic housing [Primenenie samouplotnyayushchihsya betonov v monolitnom domostroenii]. System Technologies. 2017. No. 2(23). Pp. 38–42. (rus)

4. Ryzhov I.N., Romanov A.N. Self-compacting concrete mixes production and usage [Samouplotnyayushchiesya betonnye smesi - proizvodstvo i primeneniye]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures. 2008. No. 1(2). Pp. 71–77. (rus)

5. Lesovik V.S., Degtev Yu.V., Voronov V.V. Binders for small architectural forms from self-compacting concrete [Vyazhushchie dlya malyh arhitekturnykh form iz samouplotnyayushchihsya betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 5. Pp. 85–89. (rus)

6. Nandhini K., Karthikeyan J. A review on sustainable production of self-compacting concrete utilizing industrial by-products as cementitious materials. Innovative Infrastructure Solutions. 2022. Vol. 7. Iss. 3. 199. DOI: 10.1007/s41062-022-00792-1.

7. Faraj Rabar H., Mohammed Azad A., Omer Khalid M. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 501. 104170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104170>.

8. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V. Some features of the mechanism of action of organo-mineral modifiers on cement systems [Nekotorye osobennosti mekhanizma dejstviya organo-mineral'nykh modifikatorov na cementnye sistemy]. Earthquake engineering. Constructions safety. 2017. No. 1. Pp. 40–46. (rus)

9. Shapovalov N.A., Lomachenko V.A., Yashurkaeva L.I., Yashurkaev O.V. Cellular concretes with superplasticizer SB-3 [Yacheistye betony s superplastifikatorom SB-3]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 2. Pp. 33–35. (rus)

10. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A. About selection of compositions of high-quality concretes with organic-mineral modifiers [O podbore sostavov vysokokachestvennykh betonov s organomineral'nymi modifikatorami]. Stroitel'nye Materialy. 2017. No. 12. Pp. 58–63. (rus)

11. Nesvetaev G.V. Technology of self-compacting concrete [Tekhnologiya samouplotnyayushchihsya betonov]. Stroitel'nye Materialy. 2008. No. 3. Pp. 24–29. (rus)

12. Troshkina E.A., Muhina K.S. Development of compositions and investigation of properties of self-compacting concrete [Razrabotka sostavov i issledovanie svoystv samouplotnyayushchihsya betonov]. Actual problems of modern science, technology and education. 2014. Vol. 2. Pp. 42–44. (rus)

13. Naruts V.V., Larsen O.A., Samchenko S.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Use of structural

characteristics in self-compacting concrete mix design with recycled concrete aggregates [Razrabotka sostavov samouplotnyayushchegosya betona na osnove betonogo loma s ispol'zovaniem strukturnykh harakteristik]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 4. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16. (rus)

14. Stepanova I.V., Schwartz F.M. High strength self-compacting concrete [Vysokoprochnyj samouplotnyayushchihsya beton]. BCE: Bulletin of construction equipment. 2020. No 11 (1035). Pp. 37–39. (rus)

15. Kalashnikov V.I. Calculation of compositions of high-strength self-compacting concrete [Raschet sostavov vysokoprochnykh samouplotnyayushchihsya betonov]. Stroitel'nye Materialy. 2008. No 10. Pp. 4–6. (rus)

16. Fedyuk R.S., Kozlov P.G., Kudryashov S.R. Self-laying concrete. Patent RF, no. 2679322, 2019. (rus)

17. Kravtsov A.V. Self-consistent concrete production method and concrete mixture. Patent RF, no. 2659290, 2017. (rus)

18. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Arzumanov I.A., Chilin I.A. New national standard for self-compacting concrete mixes [Novyj nacional'nyj standart na samouplotnyayushchiesya betonnye smesi]. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. No. 3 (30). Pp. 30–40. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-3(30)-30-40. (rus)

19. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kiselyova Ju.A., Prigozhenko O.V., Kardumyan G.S., Urgapov V.I. Erection of unique structures made of modified concrete and used for construction of the complex “Federation” MMDTS “Moscow-City” [Opyt vozvedeniya unikal'nykh konstrukcij iz modifitsirovannykh betonov na stroitel'stve kompleksa “Federation”]. Industrial and civil engineering. 2006. No. 8. Pp. 20–22. (rus)

20. Kaprielov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fiber concrete for monolithic structures [Sverhvysockoprochnyj samouplotnyayushchihsya fibrobeton dlya monolitnykh konstrukcij]. Stroitel'nye Materialy. 2013. No. 7. Pp. 28–30. (rus)

21. Fedyuk R.S., Mochalov V.S., Lesovik V.S., Gridchin A.M., Fisher H.-B. Composite binding and self-fitting fiberbetons for protective facilities [Kompozitsionnye vyazhushchie i samouplotnyayushchiesya fibrobetony dlya zashchitnykh sooruzhenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No 7. Pp. 77–85. DOI: 10.12737/article_5b4f02bf93df52.30110991. (rus)

22. Batudaeva A.V., Kardumyan G.S., Kaprielov S.S. High-strength modified concretes from self-

leveling mixtures [Vysokoprochnye modifitsirovannye betony iz samovyravnivayushchih smesey]. Concrete and reinforced concrete. 2005. No. 4. Pp. 14–18. (rus)

23. Ogurtsova Y.N., Netsvet D.D., Kuzmina N.O., Usikov S.A. Calculation of grade strength and durability of a cement binder with a nanostructured modifier. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Iss. 3. 032087. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032087.

24. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building material [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov]. Resource-saving technologies of building materials, products and structures. Belgorod: Veselitsa. 1993. Pp. 8. (rus)

25. Rakhimbayev Sh.M., Avershina N.M. Prediction of the durability of building materials by a single test period [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov po edinichnomu sroku ispytaniya]. Stroitel'nye Materialy. 1994. No. 4. Pp. 17–18. (rus)

26. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of

self-compacting concrete using a complex of modifiers [Sostav i svoystva samouplotnyayushchegosya betona s ispol'zovaniem kompleksa modifikatorov]. Stroitel'nye Materialy. 2021. No. 12. Pp. 48–54. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-798-12-48-54. (rus)

27. Tanabe K. Solid acids and bases [Tverdye kisloty i osnovaniya]. Moscow: Mir, 1973. 156 p. (rus)

28. Acid-base properties of the surface of solids: method. Instructions [Kislotno-osnovnye svoystva poverhnosti tverdykh veshchestv: metod. ukazaniya.]. L.: LTI im. Lensoвета, 1989. 23 p. (rus)

29. Zakharova N.V., Sychev M.M., Korsakov V.G., Myakin S.V. evolution of donor-acceptor centers on the surface of BaTiO₃ – CaSnO₃ ferroelectric materials in the course of their dispersion [Evolutsiya donorno-akceptornykh centrov poverhnosti segnetoelektrikov pri dispergirovani]. Condensed Matter and Interphases. 2011. Vol. 13. No. 1. Pp. 56–62. (rus)

30. Butt Yu.M., Timashev V.V. Tutorial on chemical technology of binding materials [Praktikum po himicheskoy tekhnologii vyazhushchih materialov]. Moscow: Higher School, 1973. 504 p. (rus)

Information about the authors

Nelubova, Viktoria V. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: nelubova@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Usikov, Sergey A. Postgraduate student of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: nataly26071992@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Netsvet, Daria D. Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: netsvet_dd@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Botsman, Larisa N. Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Materials Science and Technology of Materials. E-mail: lora80@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Shapovalov, Nikolaj A. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received 05.04.2022

Для цитирования:

Нелюбова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Ботсман Л.Н., Шаповалов Н.А. Прогнозирование прочности цемента с модификаторами для самоуплотняющихся бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17

For citation:

Nelyubova V.V., Usikov S.A., Netsvet D.D., Botsman L.N., Shapovalov N.A. Predicting the strength of cement stone with modifiers for self-compacting concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27

Солодов Н.В., *Водяхин Н.В., Кочерженко В.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: partietz5000@bk.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СМЯТИЯ И СДВИГА В БОЛТОСВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ

Аннотация. В статье изложены результаты исследований, которые продолжают ранее выполненные авторами работы по комбинированным болтосварным соединениям для строительных металлоконструкций. Приводятся данные о параметрах напряженно-деформированного состояния конечноэлементных моделей физических образцов болтовых, сварных и болтосварных соединений. Эти образцы к настоящему времени изготовлены и подготавливаются к проведению испытаний. Особенность конструкции физических образцов и численных моделей заключается в том, что в них созданы условия для реализации предельного состояния, обусловленного смятием болтом кромки отверстия в более тонкой детали и ее последующего разрыва (выкола). В последующем данные о параметрах НДС численных моделей и физических образцов предполагается сравнить. При компьютерном моделировании болтосварных образцов принимается, что сварные швы выполнены (наложены) после того, как конечноэлементная модель болтового соединения была нагружена на определенную часть его несущей способности по критерию смятия. Такие условия соответствуют работе болтового соединения, усиленного при частичной разгрузке сварными швами. Тем самым предполагается, что в болтовом соединении, перед его усилением сварными швами, в значительной мере деформации будут проработаны. Это, по гипотезе авторов, создает благоприятные условия для совместной работы болтового соединения и сварных швов при его нагружении после усиления. Полученные данные численного моделирования в целом подтверждают приведенную выше гипотезу о возможной совместной работе сварных швов и болтового соединения, в котором реализуется предельное состояние по смятию и которое было усилено при частичной разгрузке сварными швами.

Ключевые слова: комбинированное болтосварное соединение, конечноэлементное моделирование, напряженно-деформированное состояние, деформативность, несущая способность, болтовые и сварные соединения.

Введение. Одно из направлений совершенствования соединений в стальных конструкциях (и не только) заключается в разработке и исследовании комбинированных соединений. Их особенностью является сочетание в одном конструктивном решении узла сопряжения или стыка более одного вида связей. Традиционные, однородные по виду используемых в качестве несущих связей, болтовые и сварные соединения хорошо изучены и массово применяются. Однако имеются также достаточно обширные исследования по соединениям [1–8], в которых в том или ином виде реализована идея комбинации, сочетания двух различных связей.

К числу таких связей, наряду с обычными и высокопрочными болтами и сварными швами, можно отнести заклепки, клеевые швы, контактная точечная или шовная сварка и так далее. В настоящее время исследованы и были внедрены в реальное производство целый ряд конструктивных решений комбинированных соединений, в том числе – следующие.

1. Болтозаклепочные – представляют собой комбинацию в одном соединении заклепок и преднапряженных высокопрочных болтов. Последние (болты) устанавливают взамен ослаблен-

ных в процессе эксплуатации заклепок. Исследования таких соединений были выполнены, в частности, Арановичем В.М., Хусидом Р.Г. [9].

2. Болтоклеевые – в таких соединениях контактные поверхности объединены не только посредством преднапряженных высокопрочных болтов (фрикционный принцип работы), но и клеевыми швами. Известна разновидность болтоклеевых соединений, в которых в состав клея добавляется наполнитель в виде корундового порошка, что приводит к увеличению сопротивления клевого шва сдвигу. Исследования в этой области были выполнены Ицковичем Г.М., Чесноковым А.С., Княжевым А.Ф., Стрелецким Н.Н. [10].

3. Болтосварные – представляют собой комбинацию в одном соединении сварных швов и преднапряженных высокопрочных болтов. Такое соединение использовалось в конструкциях монтажных стыков пролетных строений мостов. Сварными швами соединялись пояса, а высокопрочными болтами, через накладки, стенка балки. Исследованиями таких стыков занимались, например, Большаков К.П., Шаферман И.М., Олеков В.М. [11].

Болтосварные комбинированные соединения с угловыми сварными швами и высокопрочными преднапряженными болтами в последние 15–20 лет активно исследуются в ряде стран (США, Канада, Китай, Южная Корея). Результаты некоторых исследований содержатся в работах [12–15].

4. Болтовые фрикционные соединения с внедряемыми проволочными элементами. В таких соединениях, при их устройстве, между поверхностями трения располагают специальные элементы из высокопрочной проволоки. Под воздействием усилия предварительного натяжения высокопрочных болтов проволока вдавливается в металл (сталь, алюминий) соединяемых деталей и при воздействии сдвигающего усилия такой элемент, выполняя роль шпонки, обеспечивает увеличение сопротивления сдвигу. Исследование описанного выше соединения было выполнено Хисимовым Р.И. и Хуснулловым Р.Г. [16].

5. Болтосрезные соединения на высокопрочных преднапряженных болтах – в основу комбинации в таком соединении положено сочетание двух механизмов его сопротивления действию усилия сдвига: на первом этапе – сопротивление за счет сил трения по контактным поверхностям; на втором этапе, после преодоления приложенным внешним усилием сил трения и сдвига соединения, добавляется сопротивление сдвигу за счет упора болтов в кромки отверстий. Работу таких соединений в нашей стране исследовали Вейнблат Б.М., Леонов В.П., Грудев И.Д., Амалин А.А., Зубков В.А., Мурадян А.А. [17–20].

6. Клеесварные соединения – в такой комбинации сопротивление сдвигу стыков тонколистовых деталей формируется за счет клеевой прослойки и сварных соединений в виде точечной или шовной контактной сварки. При этом площадь склеиваемой поверхности существенно превышает площадь точечной или шовной контактной сварки. Исследования клеесварных соединений выполнялись, например, Шавыриным В.Н., Рязанцевым В.И. и др.

7. Клееклепаные соединения – в таком соединении роль дискретных связей, при клеевом шве по всей прилегающей поверхности стыкуемых деталей, выполняют заклепки. Исследование клееклепанных соединений выполняли Заривняк И.С., Барушковский А.Л., Максименко В.Н., Матвиенко В.А., Тягний А.В. [21].

8. Клеенагельные и клеегвоздевые соединения образуют комбинацией болтовых нагелей или гвоздей с клеевыми швами в узлах строительных дощатых конструкций. Прочность и деформативность таких узлов исследовал Еропов Л.А. [22].

Приведенные выше варианты комбинированных соединений относятся к числу несущих, то есть обеспечивают выполнение элементами с такими соединениями тех или иных несущих функций. При этом следует отметить, что по области применения они относятся не только к строительным конструкциям, но и к машиностроению, автомобилестроению, авиационной промышленности и ряду других областей.

Исследуемая проблема и рабочая гипотеза. Постановка проблемы. Обосновать и исследовать возможность совместной работы первоначально существенно разнодеформативных связей (болты обычной прочности и фланговые угловые сварные швы) в комбинированном болтосварном соединении, воспринимающем усиление сдвига и образованном путем усиления болтового соединения, после его частичной разгрузки, сварными швами.

Рабочая гипотеза. При работе болтового соединения в период, предшествующий его усилению, значительная часть упруго-пластических деформаций болтовых связей прорабатывается. Если после этого выполнить усиление болтового соединения (в условиях частичной разгрузки) путем наложения угловых фланговых сварных швов, то при последующем нагружении образованного комбинированного болтосварного соединения возможна достаточно эффективная совместная работа болтовых связей и сварных швов на возрастающую после усиления нагрузку. При этом несущая способность комбинированного болтосварного соединения ожидаемо должна быть выше несущих способностей отдельно взятых аналогичных болтового и сварного соединений. Предполагается, что указанный эффект достигается как при реализации в болтовых связях работы на смятие контактной кромки отверстия болтов, так и при работе болтов на срез.

Для исследования поставленной проблемы и подтверждения выдвинутой гипотезы исследования использованы следующие методы и средства:

- аналитический обзор результатов ранее выполненных исследований комбинированных соединений;

- компьютерное моделирование работы под нагрузкой образцов болтового, сварного и комбинированного соединений в вычислительном комплексе ANSYS при реализации в болтовых связях работы на смятие;

- сравнительный анализ результатов численного (компьютерного) моделирования и обоснование выдвинутой гипотезы.

Основная часть. Отечественной нормативной методикой расчета болтовых соединений на

болтах обычной прочности, воспринимающих усилие сдвига, несущую способность предписывается принимать по меньшей из двух значений расчетной предельной нагрузки:

- по критерию среза болтов в соединении;
- по критерию смятия металла контактной кромки отверстия болта (фактически реализуемого в форме выкола детали со стороны ее нагруженной кромки).

Ранее [23-25] были изложены результаты исследований комбинированных болтосварных со-

единений, в которых работа болтовых связей лимитируется по критерию среза болтов и конструктивно гарантированным ненаступлением предельного состояния по критерию смятия [26-28]. Образцы для численного моделирования в настоящей статье, напротив, конструктивно исключают возможный срез болтов. Для реализации процесса смятия (выкола) в конструкции образца используется тонкая, по сравнению с двумя существенно более толстыми пластинами, стенка прокатного двутавра. Общий вид образцов для численного моделирования показан на рисунке 1.

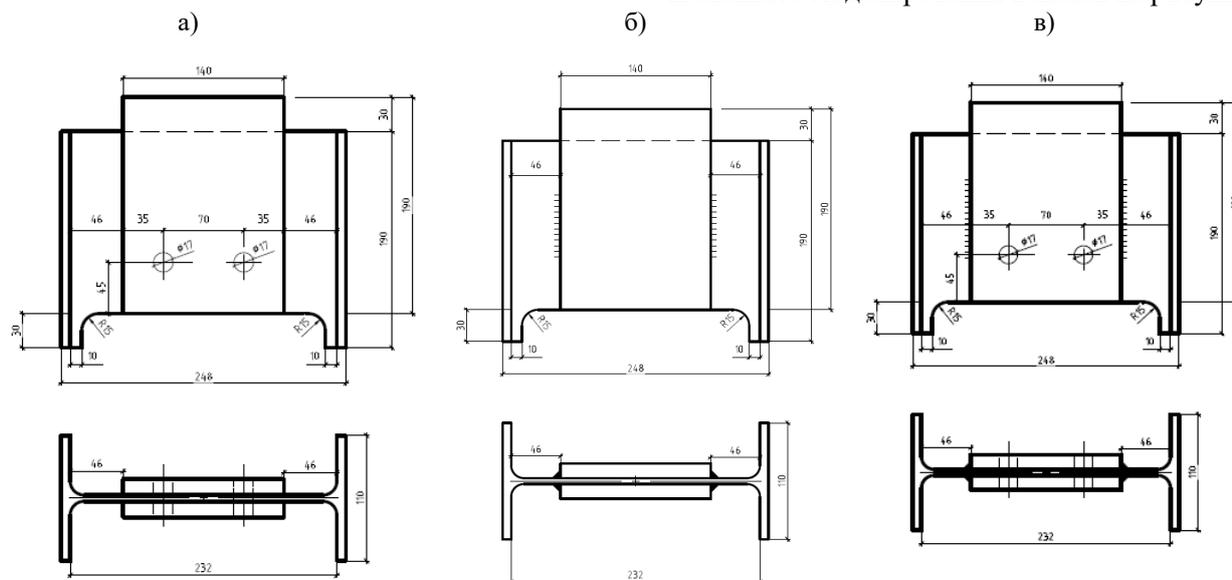


Рис.1. Конструктивное решение исследуемых образцов:

- а) конструкция образца группы SM345B; б) конструкция образца группы SM345W;
в) конструкция образца группы SM345Comb

Образцы представляют собой нахлесточное двухсрезное соединение класса точности. В стенке двутавра и двух пластин: пластины имеют размеры 190×140 мм, толщиной 12 мм, двутавр 25Б1 с толщиной стенки 5 мм. Образцы запроектированы из стали С345. В качестве связей применены болты класса прочности 5.8 диаметром 16 мм, диаметр отверстий принят 17 мм, сварные швы запроектированы длиной 60 мм с катетом сварного шва 6 мм. Способ сварки – ручная электродуговая, в нижнем положении, электроды тип Э-50.

Моделируемые образцы разделены на три группы. Первая группа образцов имеет маркировку SM345B и болтовые связи. Образцы второй группы, с маркировкой SM345W, имеют связи в виде четырех угловых фланговых сварных швов. В образцах третьей группы принята маркировка SM345Comb, а сопротивление соединения сдвигу обеспечивается комбинацией болтовых связей и сварных швов, идентичных тем, что использованы в образцах первой и второй групп.

Так как комбинированное соединение образовано путем усиления болтового в условиях его частичной разгрузки, то для учета истории нагружения и моделирования комбинированного соединения принято следующее. Болтовое соединение предварительно нагружается до необходимого уровня, который соответствует уровню разгрузки при усилении, с «выключенными» из работы сварными швами. Затем, при помощи специальной процедуры программного комплекса ANSYS, которая называется «рождение и смерть элемента», сварные швы включаются в работу и нагружение численных моделей продолжается.

При численном моделировании варьировали уровень предварительного нагружения, принимая его равным 40,0, 80,0, и 100,0 кН, что соответствует 39,2 %, 78,4 %, 98 % от расчетной предельной нагрузки для болтового соединения по критерию смятия в соответствии с методикой расчета, приведенной в СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции».

Разбиение образцов на конечные элементы производили посредством программного комплекса ANSYS. Расчеты выполнены с учетом геометрической и физической нелинейности.

Результаты исследований. На рисунке 2 представлен общий вид численных моделей образцов SM345B и SM345W.

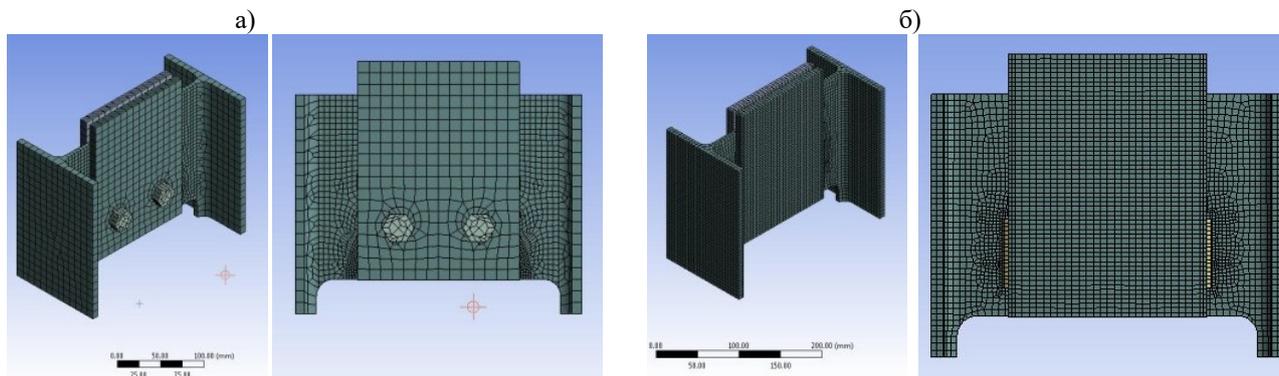


Рис.2. Общий вид конечноэлементных моделей исследуемых образцов:
а) образец группы SM345B; б) образец группы SM345W

В ходе численного моделирования величина несущей способности образцов группы SM345B составила 160,0 кН, перемещение нижних торцов крайних пластин по направлению приложенной нагрузки составило 1,8 мм. При численном моделировании за несущую способность образца принималась величина достигнутой нагрузки, при которой начиналось расхождение итерационного

процесса. Графическое представление НДС численной модели болтового соединения (изополя напряжений в стенке двутавра σ_z , перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки) на этапе нагружения, соответствующего предельной нагрузке, приведено на рисунке 3.

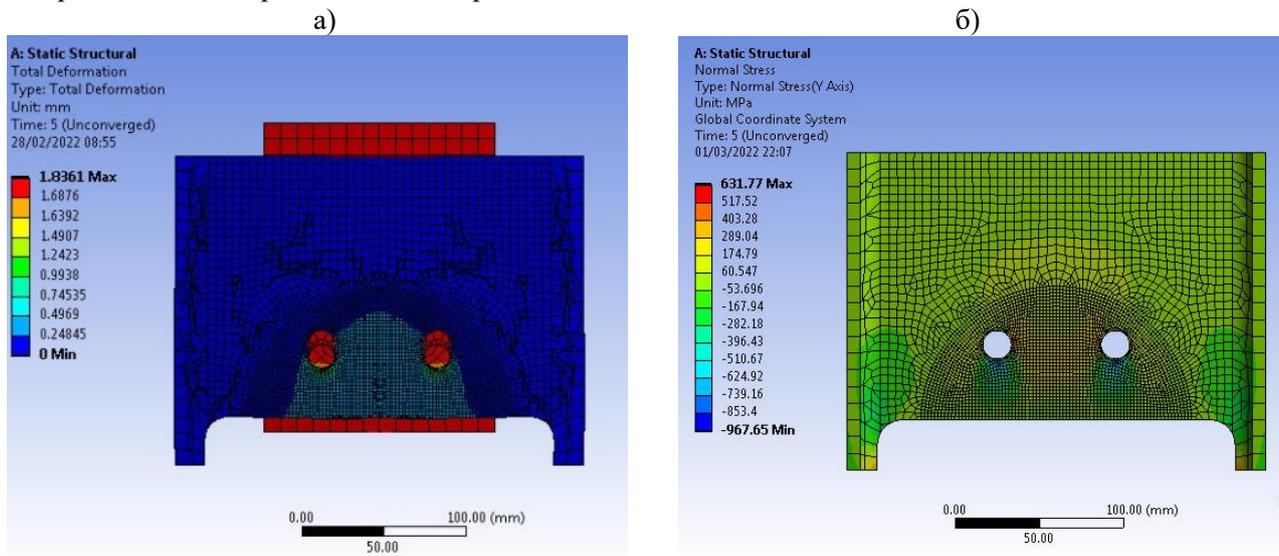


Рис.3. Графическое представление НДС образца группы SM345B по результатам численного моделирования:
а) перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки;
б) изополя напряжений σ_z в стенке двутавра

Несущая способность образцов группы SM345W по результатам численного моделирования составила 260 кН. На рисунке 4 представлено изображение НДС численной модели сварного соединения (изополя напряжений в стенке двутавра σ_z , перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки) на этапе нагружения, соответствующего предельной нагрузке.

На рисунке 5 представлен общий вид численной модели образца третьей группы - SM345Comb.

Несущая способность образцов комбинированного соединения в ходе численного моделирования составила 350 кН. НДС численной модели комбинированного болтосварного соединения (изополя напряжений в стенке двутавра σ_z , перемещение крайних пластин по направлению

приложенной нагрузки) в графическом виде при предельной нагрузке отображено на рисунке 6.

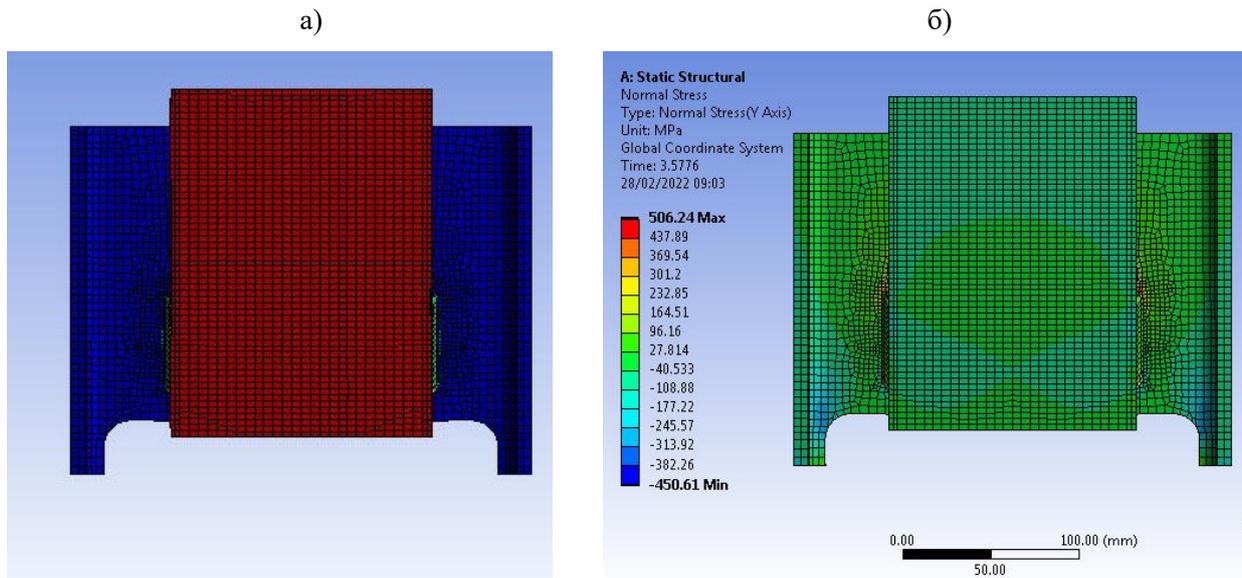


Рис. 4. Графическое представление НДС образца группы SM345W по результатам численного моделирования:
 а) перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки;
 б) изополя напряжений σ_z в стенке двутавра

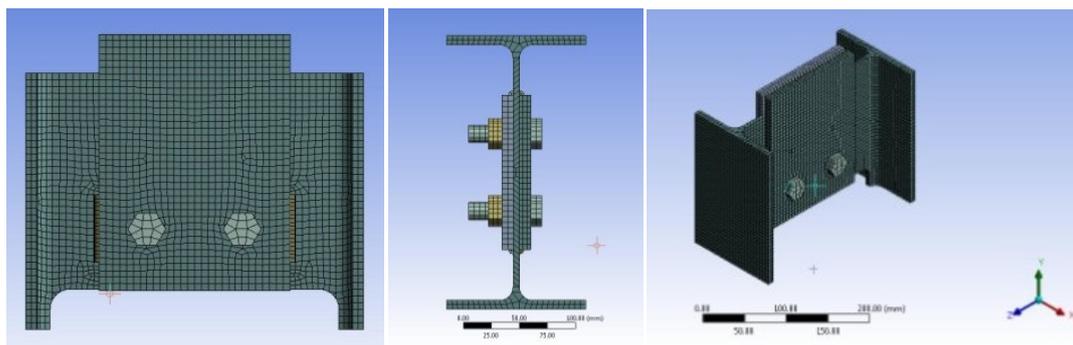


Рис. 5. Общий вид численной модели образцов группы SM345Comb

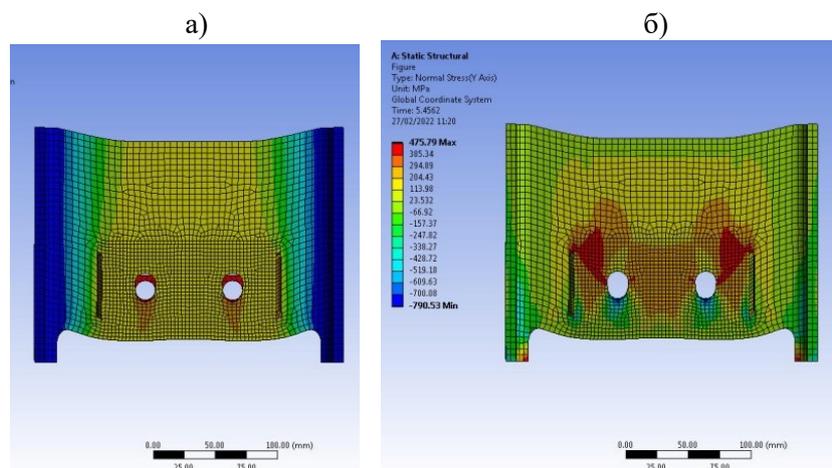


Рис. 6. Графическое представление НДС образца группы SM345B по результатам численного моделирования:
 а) перемещение крайних пластин по направлению приложенной нагрузки;
 б) изополя напряжений σ_z в стенке двутавра

На рисунке 7 приведены диаграммы деформирования исследуемых численных моделей комбинированных болтосварных образцов.

При численном моделировании было исключено «отрицательное» положение тела болта относительно отверстия деталей, что было подробно исследовано в работах зарубежных исследователей [29, 30]. Под «отрицательным» положением подразумевается случай, когда между телом болта и кромкой отверстия по направле-

нию приложения нагрузки имеется зазор. В исследуемых численных моделях в момент приложения нагрузки тело болта имело непосредственный контакт с каждой из кромок отверстий деталей по направлению передачи и восприятия приложенной нагрузки.

Приведенные диаграммы отчетливо иллюстрируют, что в комбинированных болтосварных соединениях наблюдается совместная работа разнотипных связей.

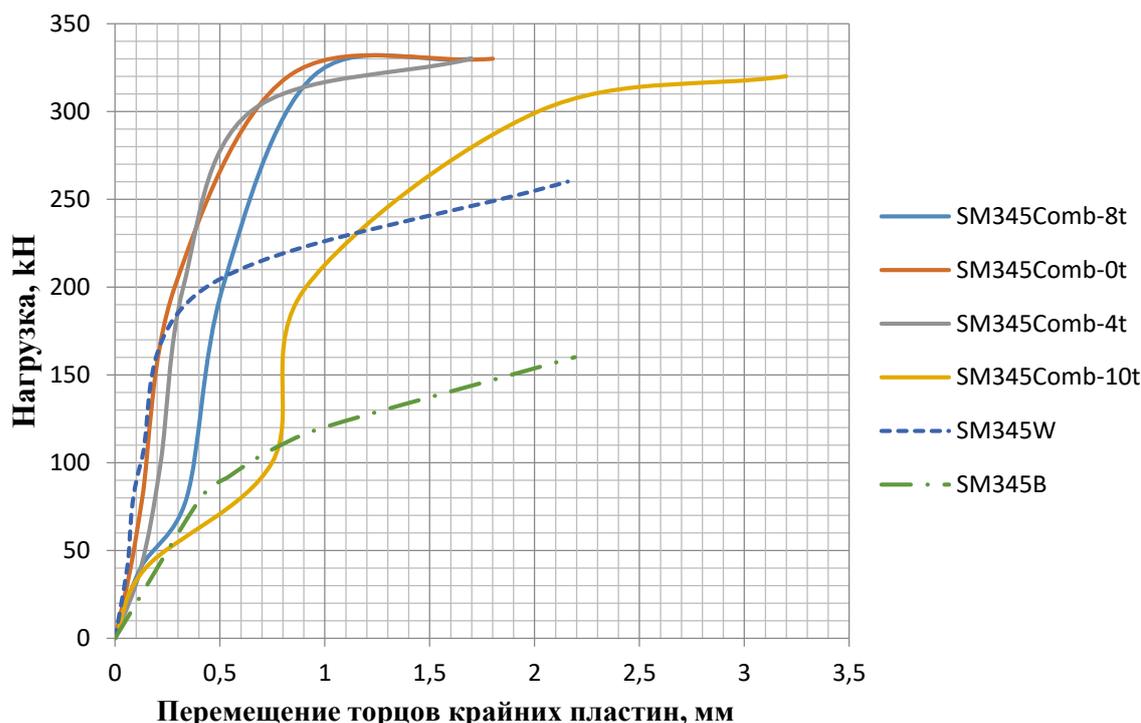


Рис. 7. Диаграммы работы под нагрузкой образцов численного моделирования

Заключение. Исследование конечноэлементной модели болтосварного соединения, образованного как болтовое соединение, усиленное при частичной разгрузке сварными швами, показало следующее:

- предельная нагрузка на болтосварное соединение больше предельных нагрузок отдельно болтового и сварного соединения, параметры которых аналогичны тем, что приняты в болтосварном соединении: на 118,2 % и 34,6 % соответственно;

- деформативность конечноэлементной модели (сближение торцов) в направлении приложения после усиления внешнего воздействия меньше деформативности модели болтового соединения и меньше деформативности сварного соединения: на 18,2 % и 14,2 % соответственно;

- предельная нагрузка на болтосварное соединение на 16,7 % меньше суммы предельных нагрузок отдельно для болтового и сварного соединений;

- эффективность совместной работы болтов и сварных швов в комбинированном болтосварном соединении, для исследованного варианта его конечноэлементной модели, можно оценить в 83,3 %, что обусловлено влиянием различной величины деформативных свойств связей в соединении в виде болтов и сварных швов;

- для обеспечения эффективной совместной работы болтов и сварных швов в комбинированном соединении частичную разгрузку болтового соединения, перед его усилением сварными швами, следует производить до уровня не менее 70 % от расчетной предельной нагрузки по критерию смятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шавырин В.Н., Рязанцев В.И., Клеесварные конструкции. М: Машиностроение, 1981. 168 с.
2. Федосейкин В.И. Экспериментально-теоретическое исследование болтоклеевых соединений в металлических конструкциях,

работающих на изгиб. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 1980. 147 с.

3. Шестов Н.М., Каргин Ю.Б. Особенности конструирования и производства клеесварных конструкций // Надежность и долговечность элементов машин. Саратов: Саратовский университет, 1975. С. 136–144.

4. Андреев Н.Х. Исследование прочности сварных и клеесварных точечных соединений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 1962. 56 с.

5. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 214 с.

6. Каленов В.В., Кармалин В.В., Павлов А.Б. О расчете несущей способности болтовых монтажных соединений на сдвиг по критерию деформативности // Сборник научных трудов. Исследование и совершенствование металлических конструкций промышленных зданий. 1984. С. 88–105.

7. Teh L.H., Uz M.E. Ultimate shear-out capacity of structural steel bolted connections // J. Struct. Eng. 2015. Vol.141, Issue 6. 04014152.

8. Zeynali Y., Jafari Samimi M., Mazroei A., AsgariMamani, Rohanimanesh M.S. Experimental and numerical study of frictional effects on block shear fracture of steel gusset plates with bolted connections // Thin-Walled Struct. 2017. No. 121. Pp 8–24. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.012.

9. Хусид Р.Г. Исследование работы комбинированных клепано-болтовых соединений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.-Л.:Изд. ЛИИЖТ, 1977. 23 с.

10. Чесноков А.С., Княжев А.Ф. Сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах. М: Стройиздат. 1974. 121 с.

11. Шаферман И.М. Разработка и исследование монтажных болтосварных стыков мостовых балок. Автореф. ... дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : (05.04.05). М. 1983. 16 с.

12. Liu M.S., Li C.A., Huang J.R., Numerical modeling and mechanical analysis of combined connection with bolts and welds // Strength Mater. 2016. Vol. 48, Issue 6. Pp. 862–869. DOI: 10.1007/s11223-017-9832-1.

13. Kim D.-K., Lee C.-H. Experimental and analytical study of combined bolted-welded lap joints including high-strength steel // Journal of Constructional Steel Research 2020. No. 168. Pp. 81–96. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105995

14. Kulak G.L., Grondin G.Y., Strength of joints that combine bolts and welds // Engineering Journal, American Institute of Steel Construction. 2003. Vol. 40. Pp. 89–98.

15. Manuel T.J., Kulak G.L., Strength of joints that combine bolts and welds // J. Struct. Eng. 2000. Vol. 126, Issue 3. Pp. 279–287.

16. Хуснуллов Р.Г. Работа соединений строительных металлоконструкций на высокопрочных болтах с внедряемыми проволочными элементами: Б.И. 1985. 170 с.

17. Амелин А.А. Работа фрикционно-срезных соединений в металлических конструкциях, эксплуатирующихся при низких температурах: Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Москва. 1994. 156 с.

18. Леонов В.П. Исследование фланцевых соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов. Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 1974. 193 с.

19. Вейнблат Б.М. Теоретические и конструктивно-технологические основы повышения эффективности соединений на высокопрочных болтах: Автореф. дис. ... докт. техн. Наук. М. 1981. 47 с.

20. Стрелецкий Н.Н., Вейнблат Б.М., Княжев А.Ф., Мурадян А.А. Соединения на несущих высокопрочных болтах в строительных металлоконструкциях // Промышленное строительство. 1979. №2. С. 27–29.

21. Тягний А.В. Определение напряженного состояния и параметров разрушения тонкостенных клееных и клееклепаных элементов авиационных конструкций с трещинами. Дис. канд. техн. наук: 05.07.03. Новосибирск. 2004. 123 с.

22. Еропов Л.А. Прочность и деформативность клеевых и клеесварных соединений в узлах дощатых строительных конструкций. Автореф. ... дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : (05.23.01) / Центр. н.-и. и проект.-эксперим. ин-т комплекс. пробл. строит. конструкций и сооружений им. В.А. Кучеренко. М. 1988. 17 с.

23. Solodov N.V., Vodyakhin N.V. Evaluation of the load-bearing capacity of the combined bolt-welded joint // Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham. 2021. Vol 151. Pp. 174–180. DOI:10.1007/978-3-030-72910-3_25.

24. Solodov N.V., Vodyakhin N.V. Experimental study and computer simulation of the work of combined bolt and weld-in connections // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol 173. Pp. 321–327. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_41.

25. Солодов Н.В., Водяхин Н.В. Об особенностях применения, конструирования и расчета комбинированных болтосварных соединений // Наука и инновации в строительстве Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. Белгород. 2020. С. 80–85.

26. Солодов Н.В., Шевченко А.В., Алейников М.В. Решение контактной задачи методом теории пластичности // Вестник БГТУ им. В.Г.

Шухова, сб. науч. тр. Вып. 10. Белгород. 2005. С. 474–477.

27. Мурадян А.А., Стрелецкий Н.Н. К расчёту на смятие элементов стальных конструкций на обычных болтах // Промышленное строительство. 1980. №3. С. 24–26.

28. Солодов Н.В., Иванов И.В., Шарик А.В. Анализ предельной деформативности болтового соединения по условию смятия // Сб. науч. трудов международной научно-технической конфе-

ренции «Региональные энергосберегающие конструкции, здания и сооружения в строительстве и коммунальном хозяйстве». Ч.1. Белгород: Изд. БелГТАСМ. 2003. С. 242–247.

29. Kulak G.L., Grondin G.Y. Strength of joints that combine bolts and welds. // Eng. Second Quarter J. 2003. Vol. 40, Issue 2. Pp. 89–98.

30. Manuel T.J., Kulak G.L. Strength of joints that combine bolts and welds // Journal of Structural Engineering. 2000. No. 3. Pp. 279–287.

Информация об авторах

Солодов Николай Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: solodov_niko_v@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Водяхин Николай Вячеславович, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: partietz5000@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кочерженко Владимир Васильевич, кандидат технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kocherzhenko_vv@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.06.2022 г.

© Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Кочерженко В.В., 2022

***Solodov N.V., Vodyahin N.V., Kocherzhenko V.V.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: partietz5000@bk.ru

STRESS-STRAIN STATE AS THE IMPLEMENTATION OF COLLAPSE AND SHEAR IN A BOLTED-WELDED JOINT

Abstract. *The results of the studies are presented which is an extension of the earlier authors' work of combined bolted-welded joints for building steel structures. Data on the parameters of the stress-strain state of finite-element models of physical specimens of bolted, welded and bolted-welded connections are given. These specimens are manufactured and are being prepared for testing. There are some special features of design of physical specimens and numerical models: the conditions which have been created for realization of limit state, conditioned by crushing of bolt edge of a hole in a thinner piece and its consequent breaking (poking out). Subsequently, it is supposed to compare data on the parameters of the numerical models and physical samples. Considering computer modeling of bolted-welded specimens, it is assumed that welds are made (imposed) after a finite-element model of the bolt connection has been loaded to a certain part of its bearing capacity according to the crushing criterion. Such conditions correspond to the operation of a bolted joint reinforced at partial unloading by welds. Thus, it is assumed that the bolted joint will be deformed largely before it is reinforced with welds. According to the authors' hypothesis, it will create favourable conditions for joint operation of the bolted joint and welds during its loading after reinforcement. The generally obtained numerical simulation data confirm the above hypothesis on the possible joint operation of welds and bolted joint, in which the limiting state in terms of buckling is realized and which is reinforced by partial unloading with welds.*

Keywords: *combined bolted-welded joint, finite-element modeling, stress-strain state, deformability, load-bearing capacity, bolted and welded joints.*

REFERENCES

1. Shavyrin V.N., Ryazantsev V.I. Bonded constructions [Kleesvarnye konstrukcii]. M: Mashinostroenie. 1981. 168 p. (rus)
2. Fedoseikin V.I. Experimental and theoretical study of bolt-and-glug joints in metal structures

working in bending [Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie boltokleevykh soedinenij v metallicheskih konstrukciyah, rabotayushchih na izgib]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. M.: 1980. 147 p. (rus)

3. Shestov N.M., Kargin Yu.B. Features of the design and production of glue-welded structures. [Osobnosti konstruirovaniya i proizvodstva kleesvarnykh konstrukcij]. Nadezhnost' i dolgovechnost' elementov mashin. Saratov: Saratovskij universitet. 1975. Pp. 136–144. (rus)
4. Andreev N.H. Investigation of the strength of welded and glue-welded spot joints [Issledovanie prochnosti svarnykh i kleesvarnykh tochechnykh soedinenij]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. M.: 1962. 56 p. ill. (rus)
5. Kashcheev V.N. Processes in the zone of frictional contact of metals [Processy v zone frikcionnogo kontakta metallov]. M.: Mashinostroenie. 1978. 214 p. (rus)
6. Kalenov V.V., Karmalin V.V., Pavlov A.B. On the calculation of the bearing capacity of bolted assembly joints for shear according to the criterion of deformability [Sbornik nauchnykh trudov. Issledovanie i sovershenstvovanie metallicheskih konstrukcij promyshlennykh zdaniy]. M.: 1984. Pp. 88–105. (rus)
7. Teh L.H., Uz M.E. Ultimate shear-out capacity of structural steel bolted connections. J. Struct. Eng. 2015. Vol. 141, Issue 6. 04014152.
8. Zeynali Y., Jafari Samimi M., Mazroei A., AsgariMamami, Rohanimanesh M.S. Experimental and numerical study of frictional effects on block shear fracture of steel gusset plates with bolted connections. Thin-Walled Struct. 2017. No. 121. Pp. 8–24. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.012.
9. Husid R.G. Study of the operation of combined riveted-bolted joints. [Issledovanie raboty kombinirovannykh klepano-boltovykh soedinenij]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. L.:Izd. LIIZHT. 1977. 23 p. (rus)
10. Chesnokov A.S., Knyazhev A.F. Shear-resistant connections on high-strength bolts. [Sdvigoustojchivye soedineniya na vysokoprochnykh boltah]. M: Stroyizdat. 1974. 121 p. (rus)
11. Shaferman I.M. Development and research of mounting bolt-welded joints of bridge beams. [Razrabotka i issledovanie montazhnykh boltsvarnykh stykov mostovykh balok]. Avtoref. ... dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk : (05.04.05) M. 1983. 16 p. (rus)
12. Liu M.S., Li C.A., Huang J.R. Numerical modeling and mechanical analysis of combined connection with bolts and welds. Strength Mater. 2016. Vol. 48, Issue 6. Pp. 862–869. DOI: 10.1007/s11223-017-9832-1.
13. Dae-Kyung Kim, Cheol-Ho Lee. Experimental and analytical study of combined bolted-welded lap joints including high-strength steel. Journal of Constructional Steel Research 2020. No. 168. Pp. 81–96. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105995.
14. Kulak G.L., Grondin G.Y., Strength of joints that combine bolts and welds. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction. 2003. Vol. 40. Pp. 89–98.
15. Manuel T.J., Kulak G.L., Strength of joints that combine bolts and welds. J. Struct. Eng. 2000. Vol. 126, Issue 3. Pp. 279–287.
16. Khusnullov R.G. The work of joints of building metal structures on high-strength bolts with embedded wire elements [Rabota soedinenij stroitel'nykh metallokonstrukcij na vysokoprochnykh boltah s vnedryaemymi provolochnymi elementami]. B.I. 1985. 170 p. (rus)
17. Amelin A.A. The work of friction-shear joints in metal structures operating at low temperatures [Rabota frikcionno-sreznnykh soedinenij v metallicheskih konstrukciyah, ekspluatiruyushchihsya pri nizkikh temperaturah]. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Moskva. 1994. 156 p. (rus)
18. Leonov V.P. Investigation of flange connections on high-strength bolts in steel structures of bridges. [Issledovanie flancevykh soedinenij na vysokoprochnykh boltah v stal'nykh konstrukciyah mostov]. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Moskva. 1974. 193 p. (rus)
19. Veinblat B.M. Theoretical and constructive-technological foundations for improving the efficiency of joints on high-strength bolts [Teoreticheskie i konstruktivno-tekhnologicheskie osnovy povysheniya effektivnosti soedinenij na vysokoprochnykh boltah]. Avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. M.. 1981. 47 p. (rus)
20. Streletsky N.N., Veinblat B.M., Knyazhev A.F., Muradyan A.A. Connections on load-bearing high-strength bolts in building metal structures [Soedineniya na nesushchih vysokoprochnykh boltah v stroitel'nykh metallokonstrukciyah]. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1979. No 2. Pp. 27–29.
21. Tyagniy A.V. Determination of the stress state and fracture parameters of thin-walled glued and riveted elements of aircraft structures with cracks [Opredelenie napryazhennogo sostoyaniya i parametrov razrusheniya tonkostennykh kleenykh i kleeklepanykh elementov aviacionnykh konstrukcij s treshchinami.]. Dis. kand. tekhn. nauk: 05.07.03. Novosibirsk. 2004. 123 p. (rus)
22. Eropov L.A. Strength and deformability of glue-nail and glue-bolt joints in the nodes of plank building structures [Prochnost' i deformativnost' kleegvozdevykh i kleeboltovykh soedinenij v uzlah doshchatykh stroitel'nykh konstrukcij]. Avtoref. ... dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk : (05.23.01). Centr. n.-i. i proekt.-eksperim. in-t kompleks. probl. stroit. konstrukcij i sooruzhenij im. V.A. Kucherenko. M. 1988. 17 p. (rus)
23. Solodov N.V., Vodyakhin N.V.: Evaluation of the load-bearing capacity of the combined bolt-

welded joint. In: Klyuev S.V., Klyuev A.V., Vatin N.I. (eds) Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 151. Springer, Cham. 2021. Pp. 174–180. DOI:10.1007/978-3-030-72910-3_25.

24. Solodov N.V., Vodyakhin N.V.: Experimental study and computer simulation of the work of combined bolt and weld-in connections. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 173. Pp. 321–327. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_41.

25. Solodov N.V., Vodyakhin N.V. On the features of the application, design and calculation of combined bolt-welded joints [Ob osobennostyah primeneniya, konstruirovaniya i rascheta kombinirovannyh boltosvarnyh soedinenij]. Nauka i innovacii v stroitel'stve. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorod, 2020. Pp. 80–85. (rus)

26. Solodov N.V., Shevchenko A.V., Aleinikov M.V. Solution of the contact problem by the method of the theory of plasticity [Reshenie kontaktnoj zadachi metodom teorii plastichnosti]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2005. No. 10. Pp. 474–477.

27. Muradyan A.A., Streletsky N.N. To the calculation of the collapse of steel structure elements on ordinary bolts [K raschyotu na smyatie elementov stal'nyh konstrukcij na obychnyh boltah]. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1980. No. 3. Pp. 24–26.

28. Solodov N.V., Ivanov I.V., Sharik A.V. Analysis of the ultimate deformability of a bolted joint according to the collapse condition [Analiz predel'noj deformativnosti boltovogo soedineniya po usloviyu smyatiya]. Sb. nauch. trudov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Regional'nye energosberegayushchie konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya v stroitel'stve i kommunal'nom hozyajstve». CH.1. Belgorod: Izd. BelGTASM. 2003. Pp. 242–247. (rus)

29. Kulak G.L., Grondin G.Y. Strength of joints that combine bolts and welds. Eng. Second Quarter J. Vol. 40, Issue 2. 2003. Pp. 89–98.

30. Manuel T.J., Kulak G.L. Strength of joints that combine bolts and welds. Journal of Structural Engineering. No. 3. 2000. Pp. 279–287.

Information about the authors

Solodov, Nikolai V. Associate professor. E-mail: solodov_niko_v@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Vodyakhin, Nikolai V. Assistant. E-mail: nat-kuts@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Kocherzhenko, Vladimir V. Associate professor. E-mail: kocherzhenko_vv@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 06.06.2022

Для цитирования:

Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Кочерженко В.В. Напряженно-деформированное состояние при реализации смятия и сдвига в болтосварном соединении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27

For citation:

Solodov N.V., Vodyahin N.V., Kocherzhenko V.V. Stress-strain state as the implementation of collapse and shear in a bolted-welded joint. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-18-27

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-28-38

¹Наумов А.Е., ²Юдин Д.А., ^{1*}Долженко А.В., ¹Прахова А.А., ¹Кучеренко А.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Московский физико-технический институт

*E-mail: da7182@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

Аннотация: экспертиза технического состояния объектов капитального строительства является ключевой задачей управляющих компаний, организаций, обеспечивающих надлежащее функционирование объектов и органов исполнительной власти – балансосодержателей большинства объектов социальной инфраструктуры городов. Граничное состояние объекта, соответствующее критическим изменениям в образующей контур его конструктивной безопасности и функциональной надежности структуре, выявляется и диагностируется по ряду внешних признаков (дефектов), количественная оценка и качественная интерпретация которых определяет, как общие результаты экспертизы объекта, так и конкретные конструктивно-технологические мероприятия по обеспечению его дальнейшей безопасной эксплуатации. Связанный с большим количеством полевых и камеральных исследований, проводимых в условиях, негативно сказывающихся на качестве результата, организационные сложности в архивировании, документировании и динамическом анализе установленных дефектов зданий, делают процесс экспертизы дорогостоящим, малоэффективным и нерациональным в общем содержательном балансе объекта. Эффективное и перспективное решение задачи снижения ресурсоемкости производства экспертиз зданий в части диагностики и дефектов и формирования основ дальнейшей советующей аналитики, существенно упрощающих выбор лучших и экономически рациональных управленческих решений в технической эксплуатации зданий, предлагается на основе введения в экспертную деятельность элементов нейросетевого анализа и обеспечивающего информационного моделирования. Авторами предложены отдельные положения интеллектуализации дефектоскопии здания, реализуемые и апробируемые на объектах проводимых строительно-технических экспертиз региона.

Ключевые слова: строительно-техническая экспертиза, строительная дефектоскопия, нейросеть, искусственный интеллект, глубокая сверточная сеть, сегментация изображений.

Введение. Своевременное выявление дефектов и повреждений строительных конструкций, а также контроль за их развитием во времени, позволяет существенно продлить жизненный цикл зданий и сооружений путем своевременного выполнения ремонта и обслуживания поврежденных конструкций. При обследовании строительных конструкций зданий и сооружений перед экспертом стоит задача по выполнению не только визуального осмотра, но и по проведению большого количества инструментальных измерений, которые, с учетом большого количества строительных конструкций, подлежащих обследованию, однотипностью и масштабностью повреждений, часто не выполняются в полном объеме, а в отчет попадают параметры, оцененные экспертом «на глаз». Также, зачастую, обследуемые строительные конструкции находятся на большой высоте и для осуществления доступа к ним требуется использование подъемных механизмов, что также приводит к получению недостоверных данных о параметрах дефектов и накоплению ошибок в собранном объеме информации. При выполнении динамического анализа выявленных дефектов вышеописанное упрощение получения исходных данных приводит к

ошибочности выводов и прогнозов по дальнейшему развитию дефектов, что ведет к несвоевременности выполнения ремонтно-восстановительных работ.

Ручной способ выявления и параметризации дефектов весьма трудозатратный и многодельный, что отражается на стоимости выполнения обследовательских работ. Высокая стоимость отражается на нарушении периодичности проведения плановых обследований, а длительный промежуток между экспертизами с отсутствием, как правило, материалов ранее проведенных обследований, приводит к неправильной постановке целей и задач проведения обследования, некачественной динамической оценке дефектов и повреждений, предложению нерациональных и экономически неэффективных методов восстановления и усиления.

Ранее в статье [1] авторами утверждалось, что периодичность и достоверность строительно-технических экспертиз может достигаться за счет автоматизации процесса сбора и анализа информации о дефектах строительных конструкций зданий и сооружений на примере плоских рулонных кровель. Это касается и других строительных конструкций, имеющих типовые дефекты и

повреждения. Предложенная методика обладает большим потенциалом совершенствования и повышения качества проводимой дефектоскопии при условии использовании современной цифровой фото- и видеоаппаратуры, в том числе, установленной на дронах, с последующей обработкой информации алгоритмами, разработанной авторами нейросети.

Основная часть. Анализ научных публикаций показывает, что за последние годы проведено большое количество исследований, в области сегментации фотоизображений для обнаружения расположенных на них объектов [2–4]. Основная цель анализа таких изображений в области строительства – это проведение градостроительного мониторинга существующей застройки территорий или имеющейся инфраструктуры. В области обследования кровель существуют работы, описывающие процесс распознавания отдельных дефектов по инфракрасным изображениям, полученным как тепловизионными, так и мультиспектральными камерами [5], при этом присутствуют факторы сегментации областей кровель с различным углом ската, которые подробно исследуются в работе [6]. Все авторы в той или иной степени сходятся во мнении, что основным фактором, ограничивающим применение методов компьютерного зрения для экспертизы строительных конструкций зданий и сооружений, является сложность учета влажности покрытия, освещения обследуемых поверхностей, теней. Решение этих вопросов может быть достигнуто путем усложнения алгоритмов распознавания изображений, а также усложнением и увеличением объема работ по обучению нейросети.

Кроме автоматизированных систем обследования кровель существуют технологии распознавания коррозионных повреждений башенных сооружений, заключающиеся в детектировании коррозии по фото- и видеоматериалам с оценкой площади повреждения, но без динамического анализа развития дефектов.

На текущий момент времени для реализации аппаратно-программного комплекса используется следующее измерительное, диагностическое и позиционирующее оборудование:

- квадрокоптер DJI Mavic 2 Enterprise Dual, оснащенный как обычной, так и тепловизионной камерой;

- парк фото- и видеокамер, в том числе на базе смартфонов под управлением IOS и Android.

- графическая станция для развертывания, обучающего и анализирующего пользовательского ПО.

Ключевым фактором качества предлагаемой технологии автоматизации поиска и диагностики дефектов зданий является повторяемость условий диагностирования, обеспечиваемая програм-

мируемой траекторией движения носителя диагностического оборудования и полной автономностью исполнения им полетного задания в случае применения БПЛА. Формулировка полетного задания, обоснованность которого существенно влияет на качество наблюдений дефектов и результаты проводимой экспертизы рационально строить в несколько ключевых этапов, определяющих табличное представление задания:

1. Задание масштаба фотографирования, при заданной высоте полета над объектом/расстояния до фотографирования;

2. Задание продольного и поперечного базиса фотографирования, значений продольного и поперечного перекрытия;

3. Задание интервала фотографирования, основанного на продольных базисах о паспортной крейсерской скорости носителя в пределах режима максимальной пространственной устойчивости;

4. Задание величины смазки для пикселя фото-видео фрагмента, основанную на технических характеристиках носителя и фотооптики измерительного оборудования

Реализуемый при апробации технологии подход к нейросетевому обучению системы распознавания диагностируемых эффектов ставит целью каталогизацию и количественную оценку параметров дефекта, формирующих основу дальнейшего этапа управленческого советования. Пример такой каталогизации, проведенной авторами на типовых дефектах плоских рулонных кровель представлен в табл. 1

Подход, используемый в ходе нейросетевого обучения системы распознавания каталогизированных в табл. 1 дефектов схематично представлен на рис. 1 [7].

Полученные выполнением маршрутным заданием носителя оборудования, локализованные (геоетеггированные) фотоснимки анализируются по классификатору выявляемых дефектов в обеспеченном вычислительными возможностями аппаратного обеспечения режиме реального времени или камеральной обработки. Установленные атрибутируемые дефектам изображения сегментируются, для каждого из сегментов определяются количественные параметры характерной области изображения, относимые к оцениваемым показателям дефекта (площадь, периметр, глубина, степен поражения, динамичность развития), полутоновые маски которых сохраняются в ВІМ-комплиментарном формате *.xml. Доступ к количественным параметрам открывает широкие опциональные возможности применения результатов экспертизы в информационном моделировании, сметном проектировании, организационно-техническом планировании ремонтных работ.

Таблица 1

Каталогизация диагностируемых дефектов на примере плоских рулонных кровель

Дефект, описание	Пример диагностируемого изображения
Локальный топологический дефект: впадины, вызывающие застаивание воды на поверхности кровельного покрытия	
Локальный топологический дефект: вздутие, вызывающее потерю целостности кровельного покрытия	
Локальный структурный дефект: растрескивание, свидетельствующее о начинающемся нарушении целостности и гидроизоляционных свойств кровельного ковра	
Локальный структурный дефект: разрыв, свидетельствующий о завершившемся нарушении целостности и гидроизоляционных свойств кровельного ковра	
Локальный структурный дефект: отслаивание, свидетельствующее о завершившемся нарушении целостности и гидроизоляционных свойств кровельного ковра	
Локальный структурный дефект: ремонт, свидетельствующий об ограниченной целостности и гидроизоляционных свойствах кровельного ковра	
Локальный структурный дефект: отсутствие ковра, свидетельствующий о технологических недостатках производства кровельных работ и полной неработоспособности кровли	
Локальный топологический дефект: биологическая коррозия, свидетельствующий о нарушении теплоизолирующих свойств покрытия	

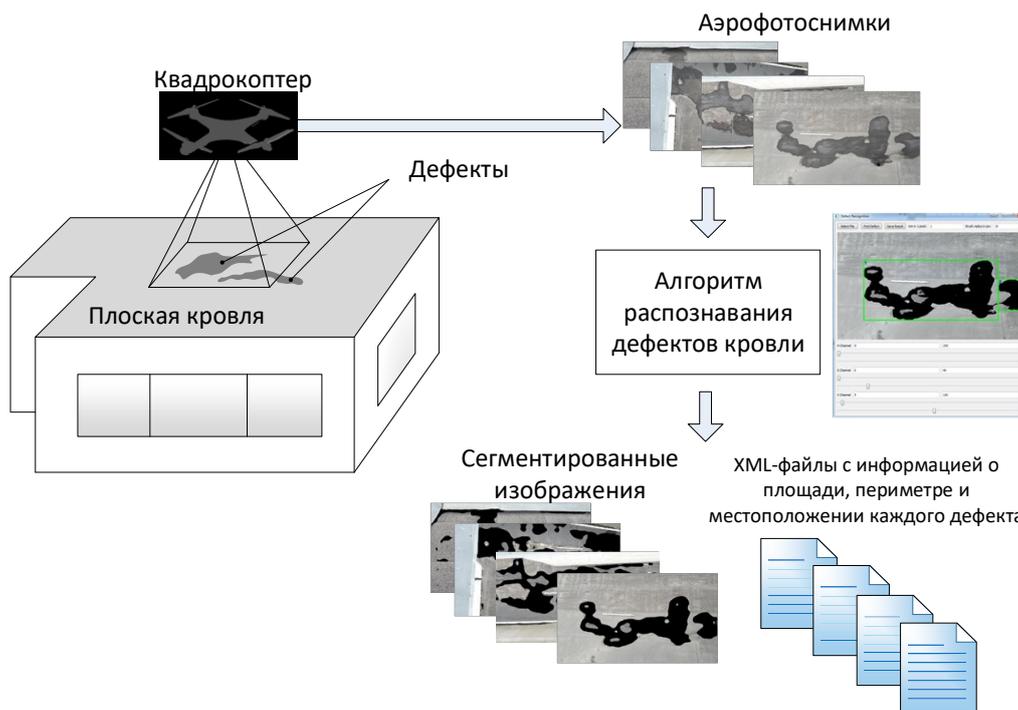


Рис. 1. Структура подхода нейросетевого обучения системы распознавания дефектов кровли [7]

Количественным параметром оценки качества работы реализованных в системе алгоритмов сегментации является мера Dice, предложенная и обоснованная работами [8] и [9] подробно описанная авторами в [7].

Рациональным подходом при обнаружении дефектов плоской кровли, по мнению авторов, является анализ бинаризованного одноканального изображения, получаемого на основе порогового RGB-HSV преобразования [10]. Порог преобразования в этом случае выбирается опытно-итерационно, учитывая оптические свойства анализируемой поверхности и условия ее освещенности, установившиеся в момент фотографирования. В целом, предлагаемый алгоритм сегментации изображения с дефектами на основе HSV-преобразования сводится к следующим основным этапам:

1. Сглаживание входного цветного изображения фильтром Гаусса для подавления шумов.
2. Дифференцированное HSV-преобразование сглаженного входного RGB изображения с установленными границами по H_{min} , H_{max} , S_{min} , S_{max} , V_{min} и V_{max} .
3. Пороговая бинаризация (маскирование) исходящего одноканального изображения по белому 255 и черному 0 значениям от попадания пикселей исходного многоканального изображения в установленные HSV-границы.
4. Отыскание на полученном бинаризованном одноканальном изображении 8-связных областей использованием двухпроходного алгоритма [11].

5. Ранжирование найденных связанных областей по пороговой величине площади области, отсечение случайных и малозначимых значений, определение пиксельных, а с использованием заданного масштаба изображения и величины смазки фото – и геометрических параметров выявленного дефекта.

7. Архивация бинаризованного изображения *.jpg и актуализированной маски *.xml с организацией доступа при информационном моделировании, динамическом и сметном анализе результатов проведенной диагностики.

Авторами предложена реализация описанного алгоритма в кроссплатформенной среде python 3.5, элементы пользовательского интерфейса приложения представлены на рис. 2. Приложение позволяет работать с основными параметрами алгоритма, отлаживать эмпирические характеристики распознавания, визуально анализировать результаты диагностики на загружаемых аэрофотоснимках.

Практически установленным недостатком реализованного приложением алгоритма является необходимость дифференцированного назначения существенно отличающихся порогов яркости. Для преодоления этого недостатка исследованы возможности технологии глубоких нейронных сетей, успешно зарекомендовавших себя в сходных задачах из других областей [12] выявлена необходимость корректировки обучающей выборки, содержащей пары (цветное изображение, сегментированное бинарное изображение).

ние), совершенствуемые вручную. Для подготовки такой выборки в приложение внесена опция ручного редактирования получаемого бинаризованного изображения (рис. 3).

Глубокие сверточные нейронные сети при работе с изображениями позволяют автоматически выявлять их текстурные особенности, что особенно эффективно для рассматриваемой задачи.

При выборе архитектуры нейронной сети учитывались подходы, доказавшие свою эффективность на задаче сегментации изображений на обучающей выборке размеченных изображений PASCAL VOC [13], содержащей 21 различных типов пикселей. К таким подходам относится обучение полностью сверточных нейронных сетей – FCN [14], использованный в работе [15] для задач сегментации биомедицинских изображений.

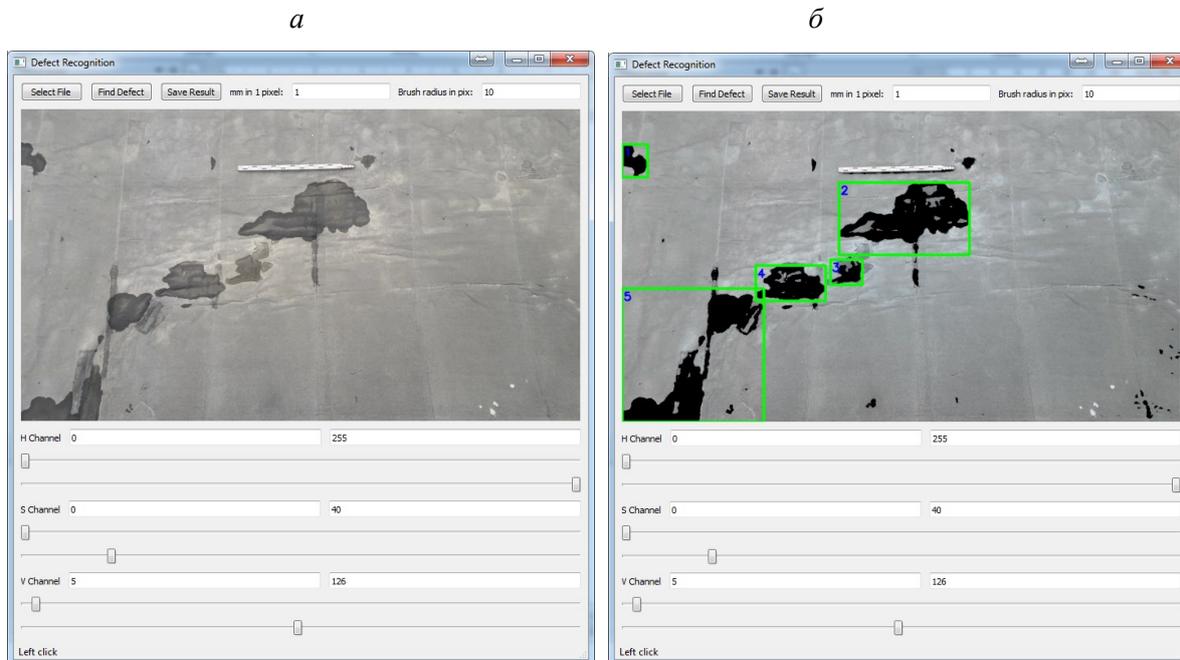


Рис. 2. Элементы интерфейса авторского приложения для распознавания дефектов на основе HSV-преобразования [7] : а – загруженное изображение, б – распознанные дефекты

$V_{max} = 162$

$V_{max} = 130$

$V_{max} = 109$

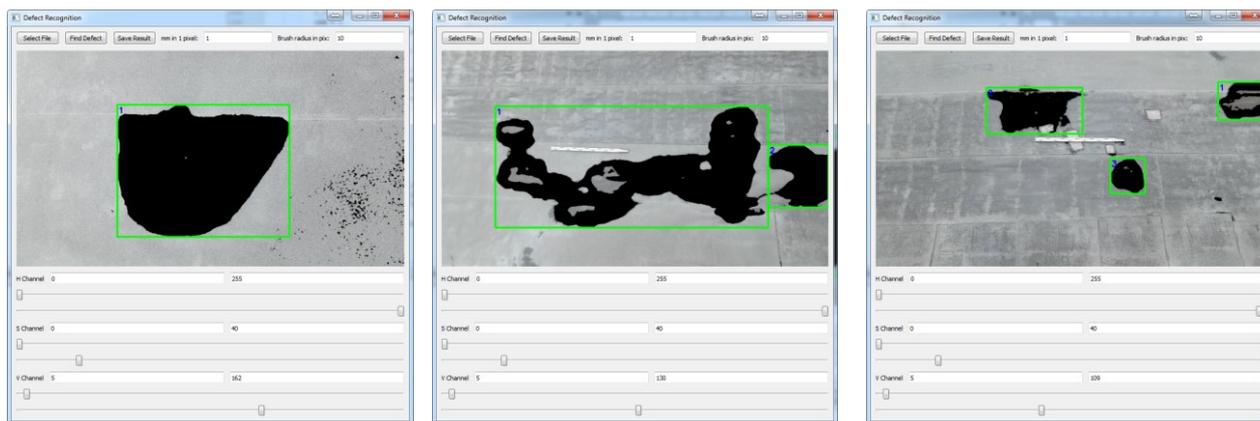


Рис. 3. Применение различных пороговых значений алгоритма HSV-преобразования для корректного распознавания изображений [7]

Процесс обучения сверточной нейронной сети был выполнен с помощью оптимизатора Adam [10] с коэффициентом скорости обучения 0.00001.

Результаты обучения полностью сверточных нейронных сетей представлены на рис. 5. Проведенный численный эксперимент продемонстри-

ровал возможность обучения полностью сверточной нейронной сети до приемлемого качества сегментации, что обеспечивает применимость глубокой полностью сверточной нейронной сети в задачах распознавания и диагностики дефектов строительных конструкции зданий и сооружений (рис. 6).

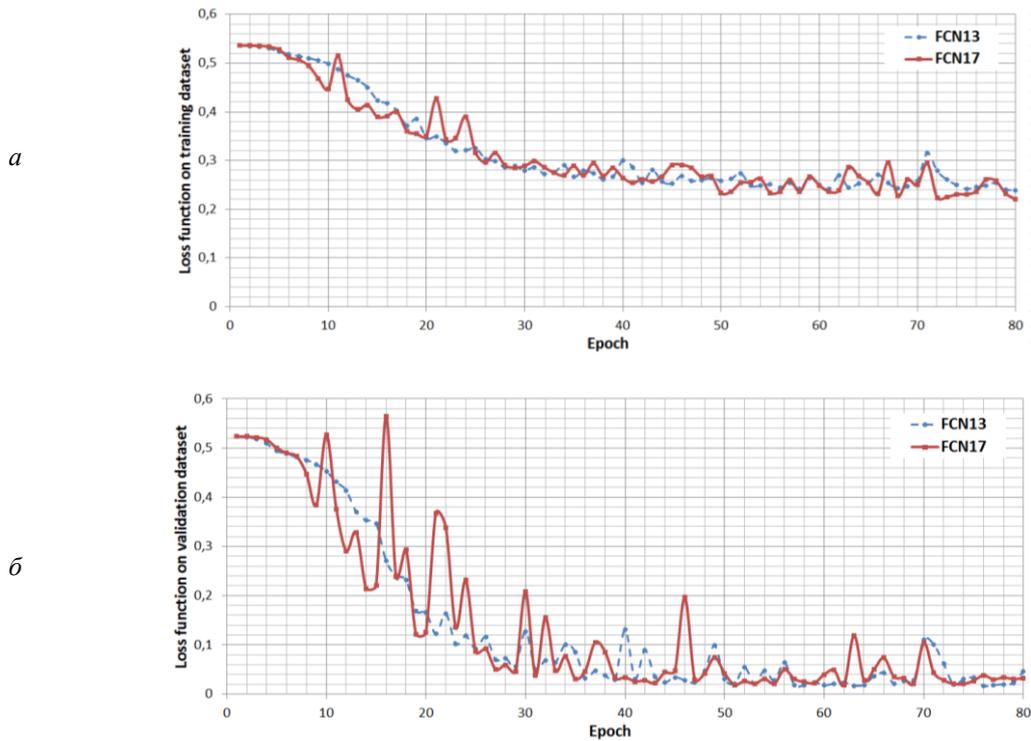


Рис. 4. Обучение глубокой сверточной нейронной сети в течение 80 эпох: *a* – функция потерь на обучающей выборке, *b* – функция потерь на тестовой выборке [7]

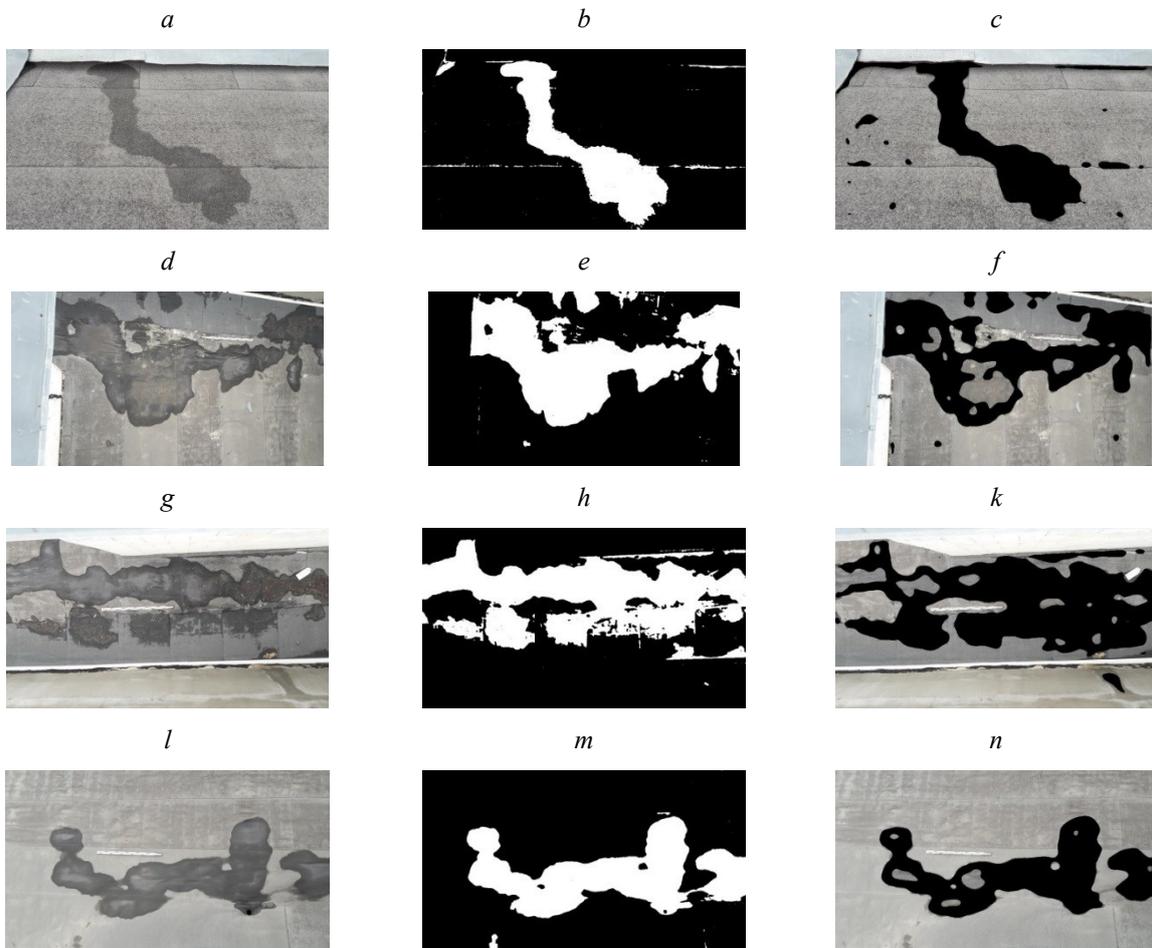


Рис. 5. Примеры распознавания дефектов с использованием глубокой полностью сверточной нейронной сети [7]: *a, d, g, l* – исходные изображения, *b, e, h, m* – подготовленные бинарные маски; *c, f, k, n* – результаты работы нейронной сети архитектуры FCN

Общее время обучения сверточной нейронной сети на 80 эпохах составило менее 20 мин (табл. 2), при скорости распознавания 5–6 кадров/сек. Это позволяет выполнять автоматизированное распознавание дефектов строительных

конструкций в режиме реального времени, без снижения качества и оперативности проведения экспертизы.

Таблица 2

Результаты работы глубоких сверточных нейронных сетей

Архитектура нейронной сети	Время обучения на 80 эпохах, с	Среднее время сегментации изображения в режиме тестирования, с
FCN17	1270.643	0,177 (5,65 fps)
FCN13	1072.485	0,151 (6,62 fps)

Практической реализацией представленных алгоритмов автоматизированного распознавания дефектов плоских рулонных кровель зданий стала разработка инженерного приложения,

обеспечивающего поликритериальную диагностику и количественную оценку требуемых для принятия технических решений и проведения сметного анализа характеристик установленных дефектов (рис. 6, 7).

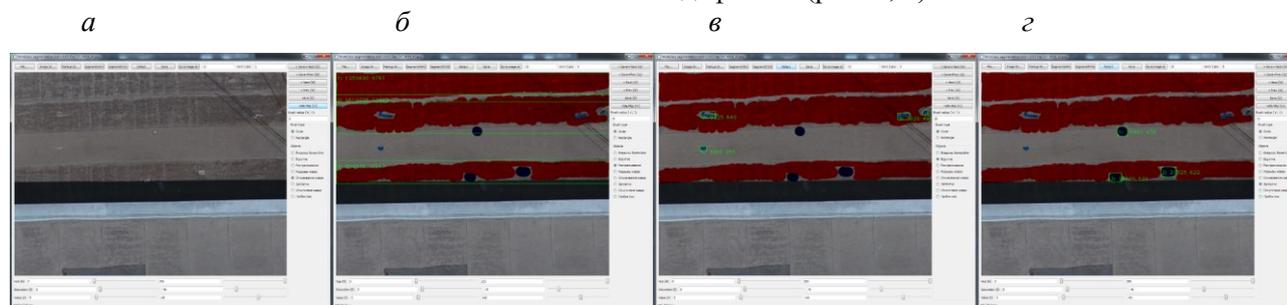


Рис. 6. Этапы работы инженерного приложения автоматизированного распознавания дефектов плоских рулонных кровель: *а* – исходное изображение; *б* – обнаружение растрескивания; *в* – обнаружение вздутия; *г* – обнаружение заплаток

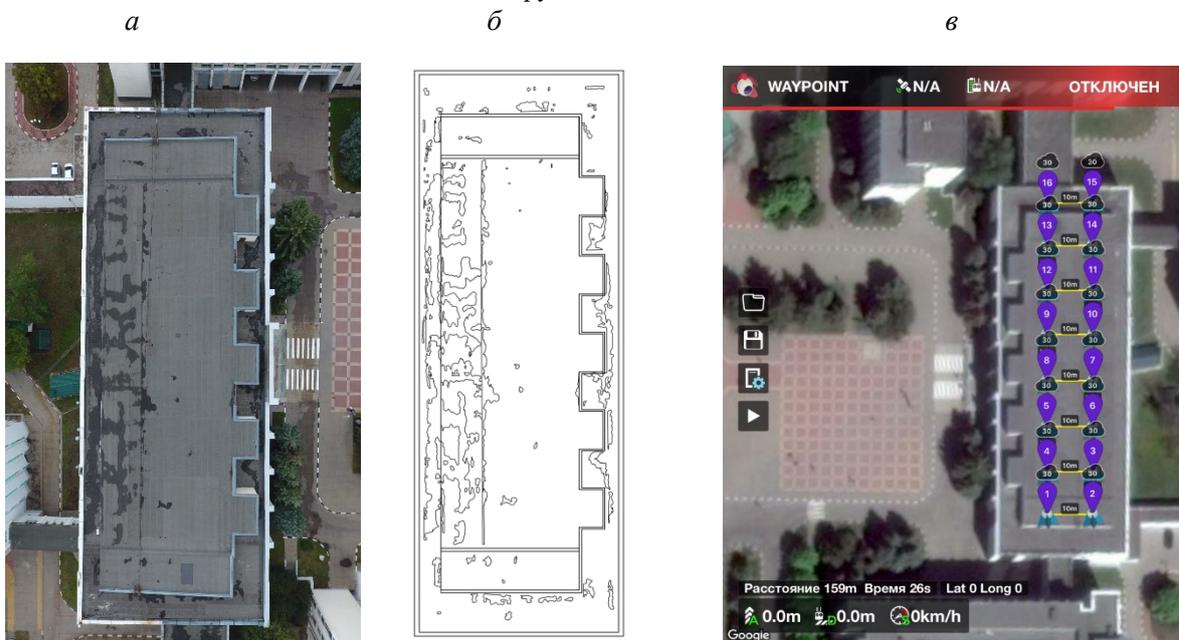


Рис. 7. Практическая работа в инженерном приложении при автоматизированном распознавании дефектов плоской рулонной кровли общественного здания в г. Белгороде:

а – рекогносцировка кровли обследуемого объекта; *б* – полетное задание носителю оборудования; *в* – актуализируемая карта установленных дефектов кровли здания

Разработанные алгоритмы и инженерное приложение адаптируется для распознавания и количественной диагностики прочих дефектов

зданий и сооружений, выявляемых в аналогичных условиях съемки и идентифицируемых схо-

жими программными технологиями. Так, например, авторами проводится комплексная работа по приложению методики и ее программного обеспечения к задачам автоматизированной дефектоскопии трещин зданий – дефектов схожей степени распространенности в строительстве, аналогичной критичности для контура конструктивной безопасности и функциональной надежности

здания, динамически меняющихся во времени и столь же трудоемких в ручных технологиях дефектоскопии (рис. 8), а также коррозионных повреждений металлических конструкций (рис. 9), в том числе и по глубине коррозионного повреждения.

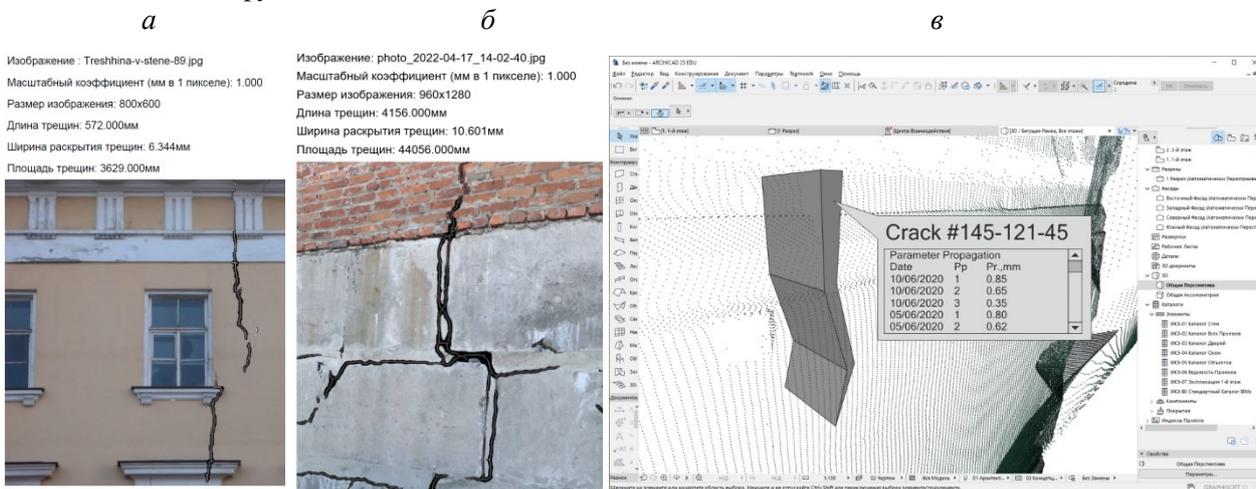


Рис. 8. Этапы работы инженерного приложения автоматизированного распознавания трещин стен зданий: а – распознавание трещин по фасаду; б – распознавание трещин в цоколе; в – параметрический объект информационной модели здания, актуализируемый проводимыми экспертизами

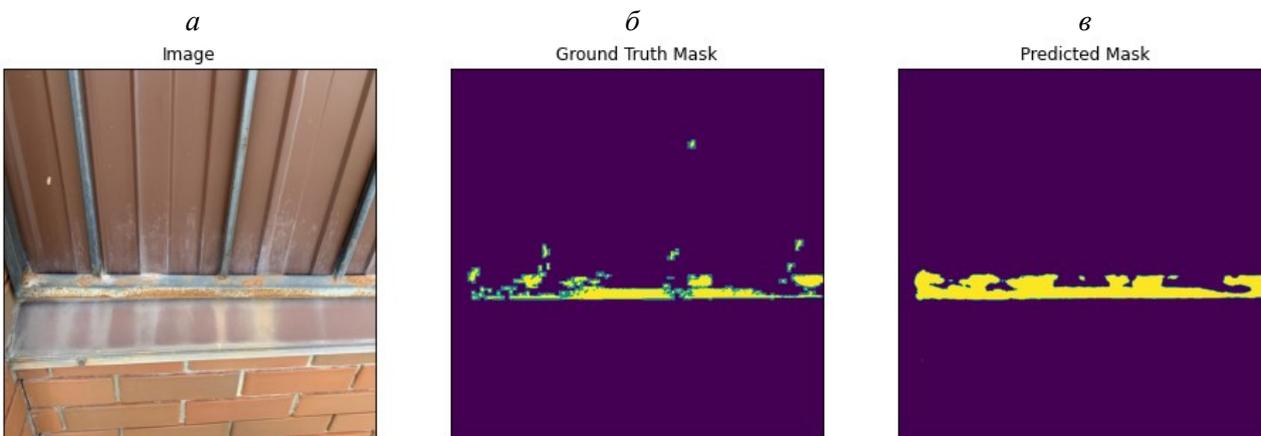


Рис. 9. Примеры распознавания коррозионных повреждений с использованием глубокой полностью сверточной нейронной сети: а — исходное изображение; б — подготовленные бинарные маски; в - результаты работы нейронной сети архитектуры FCN

Выводы. Разработанное авторами программное обеспечение, автоматизирующее процесс распознавания и количественной оценки параметров трещин в стенах зданий, дефектов плоских рулонных кровель и коррозионных повреждений металлических конструкций многократно протестировано и на наборе данных, состоящем из фотографий дефектов и их бинарных масок. Уже сейчас предложенный подход к нейросетевому обучению автоматизированной системы распознавания и диагностики типовых дефектов строительных конструкций на основе

FCN показал приемлемые результаты сегментации изображений из обучающей и тестовой выборок по показателю средней величины меры качества *Dice*, что позволяет выделять области таких дефектов как трещины, коррозия, а также типовые дефекты плоских рулонных кровель с приемлемым для практического применения качеством. В качестве основного алгоритма принят ранее не применявшийся к рассматриваемой задаче подход на основе глубоких полностью сверточных нейронных сетей, позволяющий повы-

силь инвариантность алгоритма к теням, освещению и изменениям типа обследуемых строительных конструкций.

Выполненное авторами инженерное приложение целесообразно к использованию в широкой цифровой экспертной практике для автоматизации мониторинга рассмотренных в работе и аналогичных по технологии распознавания и трудоемкости ручной альтернативы дефектов зданий и сооружений, обеспечивающих динамически актуализируемый, кроссплатформенный, объективный доступный информационный ресурс, существенно расширяющей текущие и перспективные возможности строительно-технической дефектоскопии, снижающий издержки на ее производство и повышающий результативность основанных на результатах экспертиз эффективных управленческих решений и технико-экономических оценок текущей и прогнозируемой конструктивной безопасности с функциональной надежностью исследуемых и эксплуатируемых объектов капитального строительства.

Источник финансирования: работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» (проект Пф-10/22) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наумов А.Е., Юдин Д.А., Долженко А.В. Совершенствование технологии проведения строительно-технических экспертиз с использованием аппаратно-программного комплекса автоматизированной дефектоскопии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №. 4. С. 61–69. DOI: 10.34031/article_5cb824d26344e7.45899508
2. Benedek C., Descombes X., Zerubia J. Building Extraction and Change Detection in Multitemporal Aerial and Satellite Images in a Joint Stochastic Approach, RR-7143, INRIA. 2009.
3. Gombos A.D. Detection of roof boundaries using lidar data and aerial photography. University of Kentucky Master's Theses. 2010
4. Puttemans S, Van Ranst W., Goedeme T. Detection of photovoltaic installations in rgb aerial imaging: a comparative study. 2015
5. Stockton G.B. Using infrared thermography in flat and low-sloped roofing systems // Journal of the National Institute of building sciences. 2014. Pp. 16–19
6. Merabet Y.E., Meurie C., Ruichek Y., Sbihi A., Touahni R. Building Roof Segmentation from Aerial Images Using a Line-and Region-Based Watershed Segmentation Technique // Sensors (Basel). 2015. Vol. 15(2). Pp. 3172–3203. DOI:10.3390/s150203172
7. Yudin D., Naumov A., Dolzhenko A., Patrakova E. Software for roof defects recognition on aerial photographs // Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1015(3). 032152.
8. Yudin D.A., Magergut V.Z. Segmentation of sintering images using texture analysis based on self-organized maps // Information technologies. 2013. Vol. 5. Pp. 65–70
9. He Y. Deep Learning Tutorial for Kaggle Ultrasound Nerve Segmentation competition, using Keras. Xi'an Jiaotong University. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/yihui-he/u-net> (дата обращения: 20.09.2022)
10. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic // Optimization 3rd International Conference for Learning Representations. San Diego, 2015. arXiv:1412.6980.
11. Vizilter Y.V., Zheltov S.Y., Bondarenko A.V., Ososkov M.V., Morzhin A.V. Processing and analysis of images in machine vision tasks: lecture course and practice. 2010. Fizmatkniga, 672.
12. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521(7553). Pp. 436–444. DOI:10.1038/nature14539
13. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. I., Winn J., Zisserman A. The PASCAL Visual Object Classes Challenge // International Journal of Computer Vision. 2011. Vol. 88(2). Pp. 303–338. DOI:10.1007/s11263-009-0275-4
14. Shelhamer E., Long J., Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation 2016PAMI 2016, arXiv:1605.06211.
15. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Springer. 2015. LNCS 9351 234–241.

Информация об авторах

Юдин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: yuddim@yandex.ru. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) Россия, 117303, г. Москва, ул. Керченская, д.1 А, корп. 1.

Наумов Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: andrena@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Долженко Александр Валериевич, старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: da7182@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Прахова Алина Александровна, магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: DzubenkoAlina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кучеренко Александра Сергеевна, магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью. E-mail: 16a2015@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.03.2022 г.

© Наумов А.Е., Юдин Д.А., Долженко А.В., Прахова А.А., Кучеренко А.С., 2022

¹Naumov A.E., ²Yudin D.A., ^{1*}Dolzhenko A.V., ¹Prakhova A.A., ¹Kucherenko A.S.

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

²Moscow Institute of Physics and Technology,

*E-mail: da7182@mail.ru

INTELLECTUALIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF CONSTRUCTION AND TECHNICAL EXPERTISE

Abstract. Examination of the technical condition of capital construction objects is a key task for management companies, organizations that ensure the proper functioning of objects and executive authorities - the balance holders of most of the social infrastructure of cities. The boundary state of an object, corresponding to critical changes in the structure forming the contour of its structural safety and functional reliability, is detected and diagnosed by a number of external signs (defects), the quantitative assessment and qualitative interpretation of which determine both the general results of the object examination and specific structural and technological measures to ensure its continued safe operation. Associated with a large number of field and desk studies conducted in conditions that adversely affect the quality of the result, organizational difficulties in archiving, documenting and dynamic analysis of the identified defects in buildings make the examination process expensive, inefficient and irrational in the overall content balance of the object. An effective and promising solution to the problem of reducing the resource intensity of the production of examinations of buildings in terms of diagnostics and defects and the formation of the foundations for further advising analytics, which greatly simplifies the choice of the best and economically rational management decisions in the technical operation of buildings, is proposed on the basis of the introduction of elements of neural network analysis and information modeling into expert activities. The authors propose separate provisions for the intellectualization of building flaw detection, which are implemented and tested at the objects of ongoing construction and technical expertise in the region.

Keywords: construction and technical expertise, construction flaw detection, neural network, artificial intelligence, deep convolutional network, image segmentation.

REFERENCES

1. Naumov A.E., Yudin D.A., Dolzhenko A.V. Improving the technology of construction and technical expertise using the hardware-software complex of automated flaw detection [Sovershenstvovanie tekhnologii provedeniya stroitel'no-tekhnicheskikh ekspertiz s ispol'zovaniem apparatno-programmnogo kompleksa avtomatizirovannoj defektoskopii]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 61–69. DOI: 10.34031/article_5cb824d26344e7.45899508 (rus)
2. Benedek C., Descombes X., Zerubia J. Building Extraction and Change Detection in Multitemporal Aerial and Satellite Images in a Joint Stochastic Approach, RR-7143, INRIA. 2009.
3. Gombos A.D. Detection of roof boundaries using lidar data and aerial photography. University of Kentucky Master's Theses. 2010
4. Puttemans S, Van Ranst W., Goedeme T. Detection of photovoltaic installations in rgb aerial imaging: a comparative study. 2015
5. Stockton G.B. Using infrared thermography in flat and low-sloped roofing systems. Journal of the National Institute of building sciences. 2014. Pp. 16–19
6. Merabet Y.E., Meurie C., Ruichek Y., Sbihi A., Touahni R. Building Roof Segmentation from Aerial Images Using a Line-and Region-Based Watershed Segmentation Technique. Sensors (Basel). 2015. Vol. 15(2). Pp. 3172–3203.

DOI:10.3390/s150203172

7. Yudin D., Naumov A., Dolzhenko A., Patrakova E. Software for roof defects recognition on aerial photographs. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 1015(3). 032152.

8. Yudin D.A., Magergut V.Z. Segmentation of sintering images using texture analysis based on self-organized maps. *Information technologies*. 2013. Vol. 5. Pp. 65–70

9. He Y. Deep Learning Tutorial for Kaggle Ultrasound Nerve Segmentation competition, using Keras. Xi'an Jiaotong University. URL: <https://github.com/yihui-he/u-net> (date of treatment: 20.09.2022)

10. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization 3rd International Conference for Learning Representations. San Diego, 2015. arXiv:1412.6980.

11. Vizilter Y.V., Zheltov S.Y., Bondarenko A.V., Ososkov M.V., Morzhin A.V. Processing and

analysis of images in machine vision tasks: lecture course and practice. 2010. Fizmatkniga, 672.

12. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015. Vol. 521(7553). Pp. 436–444. DOI:10.1038/nature14539

13. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. I., Winn J., Zisserman A. The PASCAL Visual Object Classes Challenge. *International Journal of Computer Vision*. 2011. Vol. 88(2). Pp. 303–338. DOI:10.1007/s11263-009-0275-4

14. Shelhamer E., Long J., Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation 2016PAMI 2016, arXiv:1605.06211.

15. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Springer. 2015. LNCS 9351 234–241.

Information about the authors

Naumov, Andrey E. PhD, Assistant professor. E-mail: andrena@mail.ru; naumov.ae@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Yudin, Dmitry A. PhD, Senior Researcher. E-mail: yuddim@yandex.ru. Moscow Institute of Physics and Technology. 117303, Russian Federation, Moscow, 1 “A” Kerchenskaya st.

Dolzhenko, Alexander V. Senior lecturer. E-mail: da7182@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Prahova Alina A., Master student of the Department of Construction Management and Real Estate. E-mail: DzubenkoAlina@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kucherenko Alexandra S., Master student of the Department of Construction Management and Real Estate. E-mail: 16a2015@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.03.2022

Для цитирования:

Наумов А.Е., Юдин Д.А., Долженко А.В., Прахова А.А., Кучеренко А.С. Интеллектуализация технологических процессов строительно-технической экспертизы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 28–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-28-38

For citation:

Naumov A.E., Yudin D.A., Dolzhenko A.V., Prakhova A.A., Kucherenko A.S. Intellectualization of technological processes of construction and technical expertise. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 12. Pp. 28–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-28-38

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-39-45

Малявина Е.Г., Ландырев С.С.Московский государственный строительный университет***E-mail: emal@list.ru*

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ НОРМ К ВНУТРЕННЕМУ МИКРОКЛИМАТУ УГЛОВОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Аннотация. В статье идет речь о лечебно-профилактических, детских образовательных и образовательных учреждениях. Именно в зданиях такого назначения не были повышены сопротивления теплопередаче окон при последнем изменении норм теплозащиты в РФ в 2018 году. В связи с этим важным является проверка выполнения требований нормативных документов к радиационной температуре и асимметрии радиационной температуры на границе обслуживаемой зоны помещений таких зданий. Литературный обзор показал, что в мире этим параметрам уделяется большое внимание. Так как сопротивление теплопередаче у окон значительно меньше, чем у наружных стен, то влияние температуры наружного воздуха на температуру внутренней поверхности окна значительно больше, чем у стен. В предлагаемой статье рассмотрено угловое помещение промежуточного этажа с окнами в наружных стенах, занимающими 35 % от площади наружных ограждающих конструкций, в г. Белгороде. Здание обслуживается воздушным отоплением. Сравнение радиационной температуры и асимметрии радиационной температуры с теми же показателями в рядовой комнате, рассмотренной ранее, показало, что при окнах указанного размера влияние второго окна заметно снижает радиационную температуру и увеличивает значения локальной асимметрии радиационной температуры. При этом в расчетный зимний период на границе обслуживаемой зоны помещения не выполняются не только оптимальные, но и допустимые требования нормативного документа.

Ключевые слова: шаровой термометр, радиационная температура, локальная асимметрия радиационной температуры, результирующая температура, расчет, расчетные зимние условия.

Введение. К рассматриваемым в статье зданиям следует отнести объекты медицинской помощи, среднего и профессионального образования, детские дошкольные образовательные учреждения. Энергосбережение и энергоэффективность зданий не должны достигаться за счет невыполнения требуемых нормами параметров микроклимата [1–4]. В то же время поддержание требуемого микроклимата без перетопов зимой и переохлаждений летом способствует экономии энергии [5–7]. Важную роль в ощущении комфорта в помещениях играет радиационная температура и локальная асимметрия радиационной температуры [8–10], часто оценку комфортности пребывания людей в помещении дают с помощью показателя PMV [11–12], в котором радиационная температура тоже учитывается. В некоторых случаях, как, например, при прерывистом отоплении оценка радиационной температуры играет важнейшую роль, особенно после перерыва в отоплении [13] или в неотопляемых православных храмах [14, 15]. Необходимо обращать внимание на состояние тепловой радиационной обстановки в помещении особенно при воздушном отоплении, когда в помещении отсутствуют отопительные приборы [16].

Однако на соблюдение норм ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» (далее ГОСТ) к результирующей температуре и локальной асим-

метрии результирующей температуры помещения «в центре обслуживаемой зоны и на расстоянии 0,5 м от внутренней поверхности наружных стен и стационарных отопительных приборов» внимания не обращается ни при проектировании, ни при экспертизе проектов.

Материалы и методы. Измерение нормируемых показателей в помещениях в соответствии с ГОСТ надлежит выполнять шаровым термометром. В настоящей работе оценка величин радиационной температуры t_r и локальной асимметрии радиационной температуры dt_r по отношению к шаровому термометру выполнялась расчетным путем. В этом расчете применялась известная из сферической геометрии формула коэффициента облученности с плоской элементарной площадки на сферу известного диаметра [17, 18]. Преимущество расчетного метода состоит в том, что оценочный расчет можно выполнить при любой температуре наружного воздуха. Наибольшие величины асимметрии радиационной температуры и наименьшие значения радиационной температуры наблюдаются при самой низкой температуре наружного воздуха, но погода редко предоставляет расчетные зимние условия для измерения. Поэтому замеренные значения параметров внутренней среды все равно придется пересчитать на расчетные условия.

Отличием результатов расчетного метода от экспериментального является получение радиационной температуры и локальной асимметрии

радиационной температуры в каждой точке измерения. Экспериментальный метод измерения определяет результирующую температуру и локальную асимметрию результирующей температуры, так как одновременно сосредотачивает на своей поверхности конвективные тепловые потоки от воздуха и лучистые потоки от поверхностей, обращенных в помещение. К сожалению, для оценки изменения температуры воздуха по объему помещения требуются довольно сложные методы расчета. Поэтому в предлагаемой работе основные усилия направлены на определение радиационной температуры и локальной асимметрии радиационной температуры, существенно зависящих от места расположения по отношению к холодным внутренним поверхностям. При определении результирующей температуры предлагается считать температуру воздуха в помещении одинаковой по объему или рассчитывать ее с помощью инженерных методов определения изменения температуры воздуха в конвективных (например, от отопительных приборов) или приточных (например, вентиляционных или инфильтрационных) струях. В предлагаемой работе температура воздуха принята постоянной по объему, так как в отсутствии источников теплоты конвективные струи отсутствуют. Воздействие вентиляционного воздуха хорошо перемешивает воздух и считается привнесением теплового потока, необходимого для поддержания в помещении результирующей температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, с точностью до $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основная часть. ГОСТ нормирует проверку t_r и dt_r на различной высоте от пола в зависимости от преимущественного положения людей в помещении (сидя или стоя), и для детских дошкольных учреждений рассматриваются свои высоты от пола. Поэтому распределения указанных параметров по помещению изучались на различных высотах. Так как наименьшие значения радиационной температуры и наибольшие значения асимметрии радиационной температуры на границе обслуживаемой зоны всегда наблюдаются напротив середины окна и на высоте, ближайшей к центру окна, то здесь предоставляются планы на расстоянии $1,7\text{ м}$ от пола. Кроме того, интерес представляет распределение t_r и dt_r по вертикальному сечению помещения по границе обслуживаемой зоны.

Следует отметить, что измерение радиационной температуры ГОСТ рекомендует выполнять полностью зачерненным шаровым термометром. Такой термометр сосредотачивает на своей поверхности радиационные потоки от всех окружающих его поверхностей. Поэтому для фиксации показаний радиационной температуры в каждой точке помещения требуется рассмотреть только

один план на каждом интересующем уровне от пола. При этом асимметрия радиационной температуры в каждой точке должна измеряться шаровым термометром, у которого одна половина зачернена, а другая имеет лучеотражающее покрытие. Поэтому замер в каждой точке состоит из двух измерений. Принципиально важно наметить, куда фронтально направлена зачерненная половина измерителя. Разность измеренных температур в точке помещения, определенных шаровым термометром для двух противоположных направлений, представляет собой локальную асимметрию результирующей или радиационной температуры. Поэтому, если локальная асимметрия радиационной температуры определяется в угловом помещении, то при фронтальном направлении зачерненной половины шарового термометра на одно окно, второе окно воздействует на шаровой термометр сбоку. Для фиксации dt_r на границе обслуживаемой зоны у второго окна следует пере-направить фронтальную ориентацию измерителя на это окно. Поэтому локальная асимметрия радиационной температуры для углового помещения с окном во второй наружной стене должна представляться на каждом уровне от пола двумя планами.

Для проверки был выбран город Белгород, с расчетной температурой наиболее холодной пятидневки обеспеченностью $0,92$, равной $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для большого числа помещений указанных зданий расчетной результирующей принята температура $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Внутренняя температура поддерживается воздушной системой отопления. Геометрия помещения промежуточных этажей для исследования была принята по реальному проекту. Длина одной наружной стены в угловом помещении равна 6 м , а другой наружной стены $5,4\text{ м}$. Высота помещения в чистоте принята $3,3\text{ м}$. В стене длиной 6 м симметрично расположено окно размером $3,8 \times 1,8\text{ м}$ при высоте низа окна от пола 1 м . Вторая наружная стена короче первой, но окно в ней тех же размеров, на той же высоте от пола и на том же расстоянии $1,1\text{ м}$ от наружного угла, что и в первой стене. Простенок после окна во второй стене короче, чем в первой и равен $0,5\text{ м}$. Площадь окон составляет 35% от общей площади вертикальных наружных ограждений помещения, а сопротивление теплопередаче окна $0,457\text{ м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Интересной оказалась оценка изменения радиационной температуры и локальной асимметрии радиационной температуры при сравнении распределения этих показателей по плану помещения в рядовой и угловой комнате при наличии второго окна во второй наружной стене. Распределение указанных параметров в рядовой комнате рассмотрено ранее в [18].

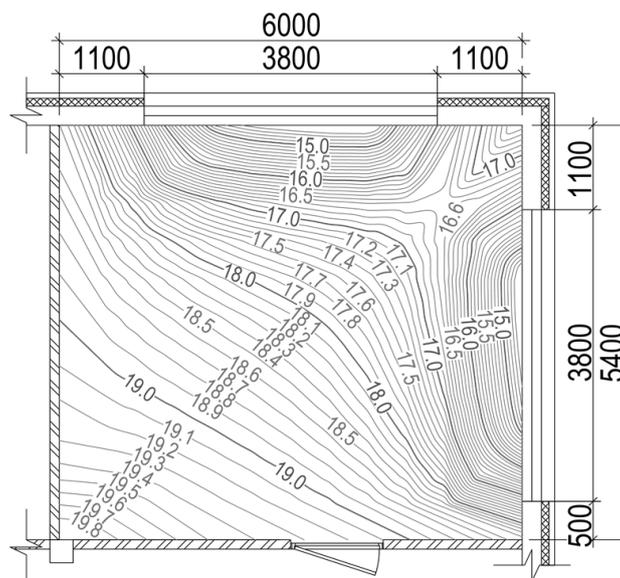


Рис. 1. Распределение радиационной температуры по плану углового помещения на высоте 1,7 м от пола

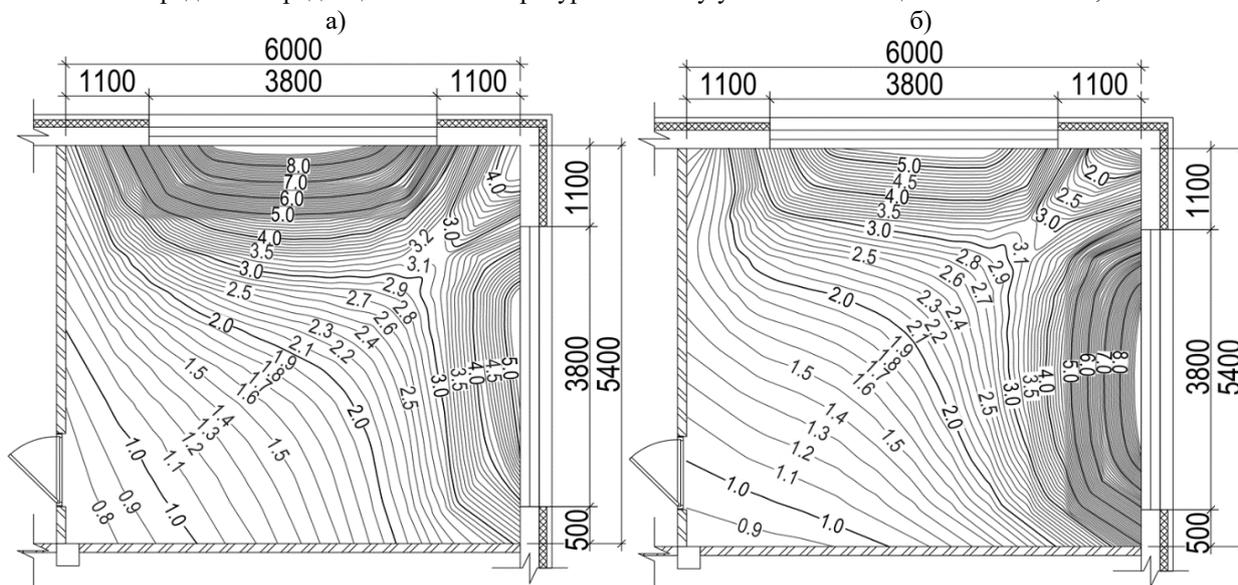


Рис. 2. Распределение локальной асимметрии радиационной температуры по плану углового помещения на высоте 1,7 м от пола:

- а) с фронтальной ориентацией шарового термометра на стену длиной 6 м,
- б) с фронтальной ориентацией шарового термометра на стену длиной 5,4 м

Рисунки 1 и 2 убеждают в том, что на t_r и dt_r в каждой точке влияние оказывают все окружающие поверхности, но в большей степени оба окна. Обращается внимание на распределение изолиний t_r и dt_r на планах помещения вблизи окон. На рисунках изолинии проведены до наружных стен и перегородок, а границы обслуживаемой зоны отстоят от них на 0,5 м. Поэтому некоторые значения указанных параметров на планах вблизи стен и перегородок имеют значения выше значений, представленных на поперечных разрезах по границе обслуживаемой зоны.

Расположение изотерм t_r практически симметрично относительно биссектрисы наружного угла, образуемого двумя наружными стенами. Расчеты выполнены при одинаковых по сопротивлению теплопередаче и размерах окон в двух стенах угловой комнаты. В угловом помещении

на высоте 1,7 м напротив окна на границе обслуживаемой зоны t_r на 1,25 °С ниже, чем в рядовом. Интересно и то, что в углу, образуемом перегородками, изотермы радиационной температуры имеют несимметричную форму по отношению к упомянутой биссектрисе наружного угла из-за разной длины простенков наружных стен около внутренних перегородок. Эти простенки в упомянутом месте оказывают значительное влияние на формирование радиационной температуры, хотя и расположены относительно далеко.

В то же время изолинии dt_r не симметричны из-за указанной выше необходимости фронтальной ориентации зачерненной половины шарового термометра поочередно на одно и другое окно. На границе обслуживаемой зоны напротив центра окна на высоте 1,7 м от пола dt_r на 0,71 °С выше, чем в рядовой комнате. Это превышение

возникло из-за одновременного влияния на локальную асимметрию радиационной температуры окон в двух наружных стенах. Если двигаться по биссектрисе наружного угла, то рядом с наружным углом dt_r ниже, а t_r выше, чем при дальнейшем продвижении. Это объясняется тем, что вначале этого пути радиационная температура формируется в большей степени температурой поверхности простенков около наружного угла, а в дальнейшем температурой внутренней поверхности окон. Около угла, образованного перегородками, просматривается различное влияние простенков разной длины в наружных стенах. Различие проявляется в том, что значения

локальной асимметрии радиационной температуры при фронтальной ориентации шарового термометра на короткую стену больше на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, чем при ориентации на длинную наружную стену.

Поперечные разрезы помещения по границе обслуживаемой зоны (рис. 3) с одной стороны тоже свидетельствуют о несимметричности изолиний за счет снижения радиационной температуры и увеличения локальной асимметрии радиационной температуры около бокового окна, а с другой, показывают, что значения на замкнутых эллипсах t_r увеличиваются, а dt_r уменьшаются при удалении от центра окна.

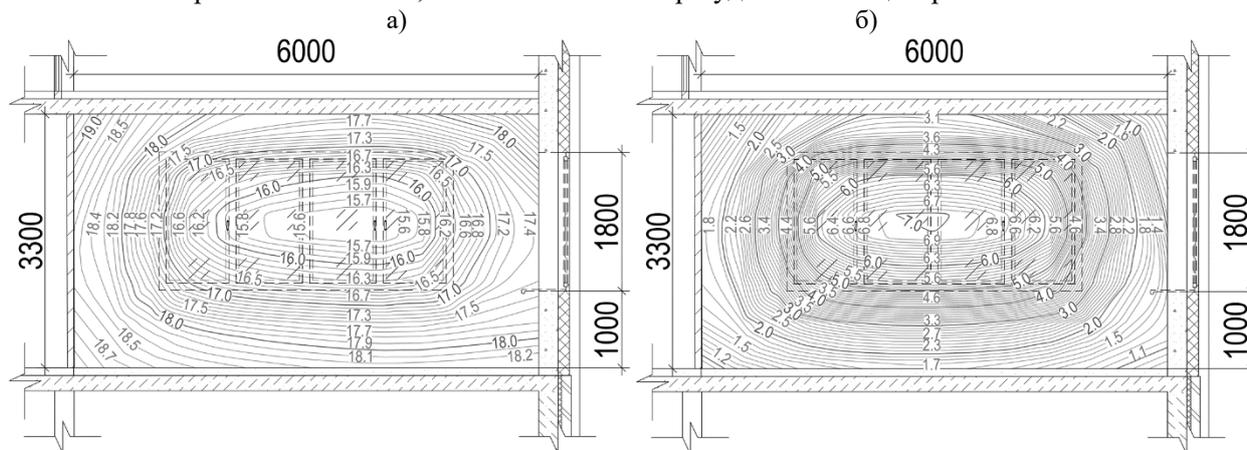


Рис. 3. Распределение радиационной температуры (рис. 3а) и локальной асимметрии радиационной температуры (рис. 3б) по поперечному сечению помещения на расстоянии $0,5\text{ м}$ от наружной стены длиной 6 м в расчетный зимний период

При этом радиационная температура помещения на границе обслуживаемой зоны остается ниже требуемой величины, так она по всей своей площади ниже результирующей температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше, чем на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пространство неудовлетворения допустимых условий по dt_r на границе обслуживаемой зоны невелико. Зона несоблюдения оптимальных требований занимает практически всю площадь окна.

Несоблюдение допустимых и особенно оптимальных норм радиационной температуры и локальной асимметрии радиационной температуры на взгляд авторов происходит, так как к выбору сопротивления теплопередаче окон нормирование подходит с теми же принципами, что и к нормированию сопротивления теплопередаче стен и покрытий. Принципы нормирования нацелены на экономию энергии на поддержание теплового микроклимата в течение отопительного периода, характеризуемого числом градусосутки отопительного периода (ГСОП). При этом не рассматривается возможность формирования низкой температуры на внутренней поверхности окна в самый холодный расчетный зимний период. А такое положение возможно, так как окно

обладает наименьшим из всех наружных ограждающих конструкций сопротивлением теплопередаче. Кроме того, окно имеет наименьшую теплоустойчивость. Поэтому оно не может сохранить более высокую температуру, даже если перед похолоданием держалась относительно теплая погода.

Выводы.

1. В угловой комнате с окнами в каждой наружной стене при фронтальной ориентации шарового термометра на одно окно значения радиационной температуры понижаются, а локальной асимметрии радиационной температуры повышаются по сравнению с этими же показателями в помещении с одним окном за счет боковой облученности от второго окна. Длина простенка около окна также оказывает влияние на распределение указанных параметров по объему помещения.

2. Предлагается при нормировании требуемого сопротивления теплопередаче окон учитывать не только градусосутки отопительного периода, как это принято сейчас, а и расчетную температуру наружного воздуха для холодного периода года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Karpenko A.V., Petrova I. Yu. The conceptual model of neuro-fuzzy regulation of the microclimate in the room // IFAC-Papers. 2018. Vol. 51, Issue 30. Pp. 636–640. doi:10.1016/j.ifacol.2018.11.229
2. Noppanuch P., Hussarua K., Boonyayothinc V., Khedaria J. A Field of the Thermal Comfort in University Buildings in Thailand under Air Condition Room // Energy Procedia. 2015. Vol. 79. Pp. 480–485. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.522
3. Teitelbaum E., Meggers F. Expanded psychrometric landscapes for radiant cooling and natural ventilation system design and optimization // Energy Procedia. 2017. Vol. 122. Pp. 1129–1134. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.436>
4. Malz S., Steininger P., Steffens O. On the development of a building insulation using air layers with highly reflective interfaces // Energy and Buildings. 2021. Vol. 236. 110779. doi:10.1016/j.enbuild.2021.110779
5. Hu W., Liu Q., Niea J., Chang M., Gaob Y., Zhang Q. Analysis on Building Thermal Environment and Energy Consumption for an Apartment in the Different Heating Modes // Procedia Engineering. 2017. Vol. 205. Pp. 2545–2552. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.230
6. Bisam Al-hafiz., Musy M., Turki H. A study on the impact of changes in the materials reflection coefficient for achieving sustainable urban design // Procedia environmental sciences. 2017. Vol. 38. Pp. 562–570. doi:10.1016/j.proenv.2017.03.126
7. Musy M., Malys L., Inard C. Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, Green Walls and Green Roofs // Procedia environmental sciences. 2017. Vol. 38. Pp. 603–610. doi:10.1016/j.proenv.2017.03.134
8. Musy M., Malys L., Morille B., Inard C. The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale // Urban climate. 2015. Vol. 14(2). Pp. 213–223. doi:10.1016/j.uclim.2015.07.004
9. Frolova A., Malyavina E. The influence of the climatic features of the construction area on the level of economical-efficient thermal protection of the office buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263(2). 04017. doi:10.1051/e3sconf/202126304017
10. Malyavina E., Zdoronok A., Ozerchuk D. Comparison of heating loads in residential, public and industrial buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. 05028. doi:10.1051/e3sconf/202124405028
11. Сладкова Ю.Н., Смирнов В.В., Зарицкая Е.В. К вопросу о гигиеническом нормировании микроклимата и качестве воздуха офисных помещений // Медицина труда и промышленная экология. 2018. №5. С. 35–39. doi:10.31089/1026-9428-2018-5-35-39
12. Кочев А.Г., Соколов М.М., Кочева Е.А., Федотов А.А. Практическое использование энергетических ресурсов в православных храмах // Известия вузов. Строительство. 2019. №7. Pp. 78–85. doi:10.32683/0536-1052-2019-727-7-78-85
13. Рябова Т.В., Сулин А.Б., Санкина Ю.Н. Обоснование и расчет эквивалентных параметров теплового комфорта помещения // Вестник международной академии холода. 2018. №2. С. 78–84. doi:10.17586/1606-4313-2018-17-2-78-94
14. Санкина Ю.Н., Сулин А.Б., Рябова Т.В., Деими-Даштбаяз М., Лысёв В.И. Обоснование параметра результирующей комфортной температуры // Вестник международной академии холода. 2021. №1. С. 28–33. doi:10.17586/1606-4313.2021-20-1-28-33
15. Дацюк Т.А., Ивлев Ю.П., Пухкал В.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №6(41). С. 12–21. doi: 10.5862/МСЕ.41.2.
16. Старкова Л.Г., Морева Ю.А., Новоселова Ю.Н. Оптимизация микроклимата в православном храме методом моделирования воздушных потоков // Вестник Южноуральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». 2018. Т. 18, №3. С. 53–59. doi: 10.14529/build180308
17. Malyavina E.G., Frolova A.A., Landyrev S.S. Microclimate Parameters Evaluation for Spaces with Windows of Different Thermal Protection // Light & Engineering. 2021. Vol. 29, No. 5. Pp. 61–67. doi: 10.33383/2021-078
18. Малявина Е.Г., Ландырев С.С. Проверка выполнения требований ГОСТ 30494-2011 к параметрам внутренней среды на границе обслуживаемой зоны // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2022. №2. С. 40–45.

Информация об авторах

Малявина Елена Георгиевна, кандидат технических наук, профессор кафедры Теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: emal@list.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26.

Ландырев Сергей Сергеевич, аспирант кафедры Теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: lanserser@mail.ru. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26.

Поступила 07.06.2022 г.

© Малявина Е.Г., Ландырев С.С., 2022

**Malyavina E.G., Landyrev S.S.*

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: emal@list.ru*

VERIFICATION OF COMPLIANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE NORMS FOR THE INTERNAL MICROCLIMATE OF A CORNER ROOM

Abstract. *The article considers the buildings of medical and preventive, children's educational and educational institutions. The resistance to heat transfer of the windows is not increased for such buildings at the last change in the norms of thermal protection in the Russian Federation in 2018. In this regard, it is important to check compliance with the requirements of regulatory documents for radiation temperature and asymmetry of the radiation temperature at the boundary of the serviced area of the premises of such buildings. A literary review has shown that much attention is paid to these parameters in the world. Since the heat transfer resistance of the windows is much less than that of the outer walls, the influence of the outside air temperature on the temperature of the inner surface of the window is much greater than that of the walls. The proposed article considers a corner room of an intermediate floor with windows in the outer walls, occupying 35% of the area of the external enclosing structures in Belgorod. The building is serviced by air heating. A comparison of the radiation temperature and the asymmetry of the radiation temperature with the same indicators in the ordinary room considered earlier showed that with windows of the specified size, the influence of the second window significantly reduces the radiation temperature and increases the values of the local asymmetry of the radiation temperature. At the same time, during the estimated winter period optimal and permissible requirements of the regulatory document are not met at the border of the serviced area of the premises.*

Key words: *ball thermometer, radiation temperature, local asymmetry of radiation temperature, resulting temperature, calculation, calculated winter conditions.*

REFERENCES

1. Karpenko A.V., Petrova I.Yu. The conceptual model of neuro-fuzzy regulation of the microclimate in the room. IFAC-Papers. 2018. Vol. 51, Issue 30. Pp. 636–640. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.11.229

2. Noppanuch P., Hussaroa K., Boonyayothinc V., Khedaria J. A Field of the Thermal Comfort in University Buildings in Thailand under Air Condition Room. Energy Procedia. 2015. Vol. 79. Pp. 480–485. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.522

3. Teitelbaum E., Meggers F. Expanded psychrometric landscapes for radiant cooling and natural ventilation system design and optimization. Energy Procedia. 2017. Vol. 122. Pp. 1129–1134. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.436

4. Malz S., Steininger P., Steffens O. On the development of a building insulation using air layers with highly reflective interfaces. Energy and Buildings. 2021. Vol. 236. 110779. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110779

5. Hu W., Liu Q., Niea J., Chang M., Gaob Y., Zhang Q. Analysis on Building Thermal Environment and Energy Consumption for an Apartment in the Different Heating Modes. Procedia

Engineering. 2017. Vol. 205. Pp. 2545–2552. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.230

6. Bisam Al-hafiz., Musy M., Turki H. A study on the impact of changes in the materials reflection coefficient for achieving sustainable urban design. Procedia environmental sciences. 2017. Vol. 38. Pp. 562–570. doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.126

7. Musy M., Malys L., Inard C. Assessment of direct and indirect impacts of vegetation on building comfort: A comparative study of lawns, Green Walls and Green Roofs. Procedia environmental sciences. 2017. Vol. 38. Pp. 603–610. doi: doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.134

8. Musy M., Malys L., Morille B., Inard C. The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. Urban climate. 2015. Vol. 14(2). Pp. 213–223. doi: 10.1016/j.uclim.2015.07.004

9. Frolova A., Malyavina E. The influence of the climatic features of the construction area on the level of economical-efficient thermal protection of the office buildings. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263(2). 04017. doi: 10.1051/e3sconf/202126304017

10. Malyavina E., Zdoronok A., Ozerchuk D. Comparison of heating loads in residential, public

and industrial buildings. E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 244. 05028. doi: 10.1051/e3sconf/202124405028

11. Sladkova Yu.N., Smirnov V.V., Zaritskaya E.V. On hygienic regulation of microclimate and air quality in office rooms [K voprosu o gigenicheskom normirovanii mikroklimate i kachestve vozduha ofisnyh pomeshchenij]. Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology. 2018. No. 5. Pp. 35–39. (rus) doi: 10.31089/1026–9428–2018–5–35–39

12. Kochev A.G., Sokolov M.M., Kocheva E.A., Fedotov A.A. Practical use of alternative energy resources in orthodox temples [Prakticheskoe ispol'zovanie energeticheskikh resursov v pravoslavnyh hramah]. News of Higher Educational Institutions. Construction. 2019. No. 7. Pp. 78–85. (rus) doi: 10.32683/0536-1052-2019-727-7-78-85

13. Ryabova T., Sulin A., Sankina Yu. Rationale and calculation of thermal comfort equivalent parameters [Obosnovanie i raschet ekvivalentnykh parametrov teplovogo komforta pomeshcheniya]. Journal international academy of refrigeration. 2018. No. 2. Pp. 78–84. (rus) doi: 10.17586/1606-4313-2018-17-2-78-94

14. Sankina Iu.N., Sulin A.B., Ryabova T.V., Deymi-Dashtebayaz M., Lisev V.I. Justification of the resulting comfortable temperature parameter [Obosnovanie parametra rezultiruyushchej komfortnoj temperatury]. Journal international academy

of refrigeration. 2021. No. 1. Pp. 28–33. (rus) doi: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-28-33

15. Datsyuk T., Ivlev Y., Pukhkal V. Results of microclimate modeling in living quarters with different types of heaters [Rezultaty modelirovaniya mikroklimate zhilyh pomeshchenij pri razlichnyh tipah otopitel'nyh priborov]. Magazine of Civil Engineering. 2013. No. 6. Pp. 12–21. (rus) doi: 10.5862/MCE.41.2

16. Starkova L.G., Moreva Yu.A., Novoselova Yu.N. Optimization of the microclimate in an Orthodox church by modeling air flows [Optimizatsiya mikroklimate v pravoslavnom hrame metodom modelirovaniya vozdushnyh potokov]. Bulletin of the South Ural State University. The series "Construction and Architecture". 2018. Vol. 18. No. 3. Pp. 53–59. (rus) doi: 10.14529/build180308

17. Malyavina E.G., Frolova A.A., Landyrev S.S. Microclimate Parameters Evaluation for Spaces with Windows of Different Thermal Protection. Light & Engineering. 2021. Vol. 29. No. 5. Pp. 61–67. doi: 10.33383/2021-078

18. Malyavina E.G., Landyrev S.S. Checking for compliance with GOST 30494-2011 requirements for indoor environment parameters at the serviced zone border [Proverka vypolneniya trebovanij GOST 30494-2011 k parametram vnutrennej sredy na granice obsluzhivaemoj zony]. ABOK (Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal). 2022. No. 2. Pp. 40–45. (rus)

Information about the authors

Malyavina, Elena G. Phd, Professor of MGSU. E-mail: emal@list.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.

Landyrev, Sergey S. Post graduate student of the MGSU. E-mail: lanserser@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.

Received 07.06.2022

Для цитирования:

Малявина Е.Г., Ландырев С.С. Проверка выполнения требований норм к внутреннему микроклимату углового помещения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 39–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-39-45

For citation:

Malyavina E.G., Landyrev S.S. Verification of compliance with the requirements of the norms for the internal microclimate of a corner room. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 39–45. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-39-45

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61

Шамаева Т.В.

Национальный Исследовательский Московский государственный строительный университет

E-mail: ShamaevaTV@yandex.ru

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОБЛИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

Аннотация. Промышленность перешла в новый качественный этап своего развития. Предпосылками перехода явились следующие факторы: развитие науки, применение современных технологий, инноваций, материалов, компьютеризация и программирование.

Тема архитектурного облика «устойчивой архитектуры» промышленного назначения остается малоизученной на текущий момент времени. Объектом исследования стал архитектурный облик современных промышленных зданий. Проведен анализ облика промышленных объектов, принадлежащих к «устойчивой архитектуре». Изучены характерные особенности архитектурных решений, с помощью которых достигнута принадлежность объекта к «устойчивой архитектуре», в том числе, в решениях облика промышленного объекта. Проанализированы объемы, фасады, основные планировочные идеи, влияющих на объем и облик объекта. Сформулированы выводы.

Меняется идеология создания промышленного объекта, и это отражается на архитектуре. Выявлена общая тенденция – это гуманизация промышленной архитектуры: частичный отход от стандартизации архитектурных решений; многофункциональность; отход от «закрытого» производства; облик здания с «размытыми» типологическими чертами промышленной архитектуры, смещение в сторону облика общественного объекта.

Сформулированы тенденции к выполнению критериев «устойчивого развития архитектуры»: использование альтернативных источников электроэнергии, инновационных технологий и строительных материалов; активное применение научных разработок; компьютеризация и программирование. Особое внимание уделяется безопасности для населения и работающего персонала, безопасности экологии. Принимается комплекс мер по ее достижению, в том числе, применение архитектурно-конструктивных решений. Уникальность фасадов, объемов, не стандартные решения идейно-планировочного характера также становятся визитной карточкой «устойчивого развития архитектуры».

Ключевые слова: архитектурный облик, инновационные идеи в архитектуре, безопасность экологии, энергоэффективные проекты.

Введение. Современная промышленная архитектура проходит новый этап своего развития. Это связано с появлением современных технологий, инновационного оборудования и материалов, компьютеризацией процессов в промышленности, – данные изменения касаются производственно-технологического процесса, основой любого промышленного объекта. Но есть и другие признаки нового этапа. Меняется идеология создания промышленного объекта, в первую очередь, это отражается в архитектуре. В том числе, и сама архитектура постепенно меняет отношение людей к промпредприятию: от заказчиков и архитекторов, до простых жителей.

В нашем сознании еще в советский и постсоветский периоды было сформировано определенное мнение о промышленных объектах: эстетически не привлекательные с точки зрения архитектуры, техногенно-опасные, несущие агрессивновредное воздействие на окружающую среду и человека. Промышленная архитектура выполняла только одну задачу, – стать оболочкой для технологического процесса. Это приводило к психологическому отторжению территорий промышленной застройки [1]. Технологический процесс и по

сей день остается в центре проектирования, но меняются требования к производству и ко всем составляющим его создания и эксплуатации объекта.

Актуальность темы. Концепция «устойчивого развития архитектуры» набирает свои обороты. Она немного сложна в понимании, так как объединяет в себя различные слагаемые. В первую очередь, это комплексный подход в проектировании объекта, симбиоз методов и принципов, которые направлены на обеспечение сегодняшнего и будущего поколений комфортной, безопасной, экологически чистой архитектурной средой высокого качественного технологического уровня. Для промышленной архитектуры данный вектор развития как никогда актуален и важен. Качество окружающей среды, экономическая привлекательность, безопасность выходят в авангард на всех стадиях создания и существования объекта: в проектировании, строительстве и во время эксплуатации. Но это не единственные требования. Архитектура промышленных объектов должна стать не агрессивной ни к человеку,

ни к окружающей среде. К архитектурному облику также есть требования, в том числе, привлекательный гуманный вид.

Цель исследования. Проанализировать архитектурный облик промышленных современных объектов, принадлежащих к «устойчивой архитектуре». Сформулировать особенности, с помощью которых достигнута принадлежность к данной архитектуре в решениях облика промышленного объекта, в том числе, объемов, фасадов, основных планировочных идей и решений, влияющих на объем и облик объекта. Ответить на ряд вопросов. Каким образом, и с помощью каких архитектурных приемов изменился облик промышленных объектов последних 10-15 лет? Если мы знаем, что объект по ряду критериев, которые касаются технологий, планировок, транспортно-пешеходных связей, взаимодействия с экологией, окружающей средой, жизненного цикла объекта, его эксплуатации и другого, принадлежит к «устойчивой архитектуре», то отличается ли его архитектурный облик от его предшественников? В чем эти отличия, и какие идеи закладываются именно в облик объекта? А какие идеи «устойчивой архитектуры» «вышли наружу» и получили отражение в облике объекта?

Вначале мы вспомним, по каким критериям, признакам объект получает статус «устойчивого развития архитектуры». Применение энергоэффективных проектов, в том числе, с возобновляемыми источниками энергии, экологически чистыми материалами; строительство высокотехнологичных объектов, применение мер по защите и даже улучшению окружающей среды, сбережению и восстановлению природных ресурсов, - не полный список признаков принадлежности объекта к «устойчивой архитектуре».

Формирование «гуманной среды» – одна из задач устойчивой архитектуры. Не навредить природе, создать безопасность, комфортность, экологичность, ориентированность на применение новейших технологий для построения организации среды жизнедеятельности. *Путь диверсификации* традиционных производств и постепенный переход к безотходным технологиям. Наступила эра качественных технологических скачков. В XX веке в производственном проектировании стали все больше внедрять «гуманизацию производственной среды». В XXI веке экологизации энергоэффективность производства выходят на первые роли. *Гуманизация* означает адаптацию промышленной среды к пребыванию в ней человека, к комфортным условиям для работающих [2]. Стремление к гармоничному балансу между вмешательством человека и существовавшей ранее природой, связь с местом и

ландшафтом играет важную роль в процессе проектирования [3].

Обзор литературы. Обратимся к литературе других авторов по аналогичной тематике и узнаем их мнение в данной области.

В статьях [1, 4] отмечены некоторые особенности планировочных решений, такие как, увеличение площадей непроизводственной части, к которым относятся не только административно-бытовые и обслуживающие помещения, но и площадей для науки и отдыха. Первые, это лаборатории, помещения для научных испытаний, офисные, обучающие помещения, - связанные с обучением и образованием, направленные на дальнейшее использование в производстве. Вторая группа помещений предназначена для совместного отдыха, проведения культурно-информационного обмена между различными слоями работающих, от офисного, административного персонала до рабочего с производства. Данные коммуникации направлены на обмен информацией и опытом, что, несомненно, полезно и важно [1, 4]. Разделение между «синими воротничками» (ручная работа) и «белыми воротничками» (канцелярская, профессиональная работа) вытесняется работой «радужных» воротничков, где различие между производственными и офисными функциями становится размытым [5]. Происходит расширение социально-рекреационных зон. Комфортные и озелененные зоны отдыха стимулируют обмен новыми идеями и неформальное общение между сотрудниками [6].

Освоение крыш – не только эстетически привлекательное использование, технологически оправданное, но оставлять большие плоскости плоских крыш – это недопустимое расточительство при создании промышленных объектов [2].

Многие авторы отмечают: уход от классической типологии современных промышленных предприятий, многофункциональность и различные способы борьбы с «закрытостью» промышленных территорий и самих объектов [1, 2, 4, 6, 9], но в тоже время одноэтажный производственный корпус остается самым удобным для размещения производственного процесса при различных объемно-планировочных принципах проектирования предприятия [7].

Важным элементом функционирования любого промышленного объекта, кроме производственного оборудования, становится инженерное оборудование и сооружения [8]. Особенно очистных сооружений, что подтвердилось на практике, при анализе объектов. Свободная планировка, естественное освещение и инсоляция, естественная вентиляция, увеличение шага конструктивных элементов, отказ от конструктивной связи

между несущими элементами здания и технологическим оборудованием, что может быть подчеркнута архитектурными средствами – отмечают многие авторы [1, 2, 4, 7–11], сокращение производственных площадей [9].

Концепции устойчивого развития должна базироваться на создании здания, в первую очередь, как экологически безопасного объекта [1, 12]. О необходимости перехода к альтернативным видам источников энергии пишут многие авторы, о возможности передачи избытка энергии от производственного объекта к другим объектам [1, 8, 9, 12–15]. Альтернативные виды источников энергии предложено разделить на возобновляемые, природные и экологически-нейтральные [1]. К альтернативным источникам относятся: не только солнце, но и геотермальные источники, а также инженерные системы накопления и распределения альтернативной энергии возобновляемых источников, а в сочетании с инновационными приемами по теплоизоляции светопрозрачного ограждения даже прямой солнечный свет можно использовать для обогрева зданий [14].

Энергетическая безопасность и автономность производства становятся неотъемлемыми требованиями современных предприятий [9]. Но невозможно полностью перейти на возобновляемые источники энергии в промышленности, не используя традиционные [13]. Нужно стремиться к разработке нулевого энергетического баланса производственного здания за счет комплекса энергосберегающих объемно-планировочных и конструктивных решений, а также использования естественных источников энергии [14]. Данные меры приведут к повышению энергоэффективности здания [15].

Сегодняшний этап развития промышленности авторы называют и третьей революцией [1, 16], и четвертой революцией [9], но название – это не столь важно, главное, все сходится во мнении, что идет новый период и он отражается, в том числе, на архитектуре промышленных объектов. Трансформации ведут к поиску новых соответствующих объемно-планировочных, функциональных и инженерных решений производственных объектов. Необходимо дальнейшее совершенствование методов проектирования [17], но полностью уходить от типизации, унификации в промышленной области не имеет смысла [18, 19].

За последние 10–20 лет появились здания и комплексы промышленного назначения, не только высокотехнологические, но и эстетически привлекательные. Такие тенденции уверенно распространяются по всему миру, и все больше проектируют промышленные здания, которые

станут настоящими архитектурными шедеврами.

Авторы отмечают следующие особенности в современном проектировании, формировании промышленных объектов, имеющих статус «устойчивого развития архитектуры»:

- изменение соотношения площадей базового функционального назначения; расширение спектра площадей различного функционала, ранее не свойственного для промышленной архитектуры; и в связи с этим, появляется multifunctionality промышленных зданий, комплексов:

- освоение крыш, использование эксплуатируемых крыш;

- частичный или полный переход на альтернативные виды источников энергии; энергетическая безопасность и автономность производства; и другое.

Многие авторы отмечают необходимость поиска архитектурных, конструктивно-технологических решений, которые приведут к общей концепции «устойчивого развития архитектуры» в промышленном проектировании. Тема архитектурного облика «устойчивой архитектуры» промышленного назначения остается малоизученной на текущий момент времени.

Научная новизна исследования состоит в том, что в данной статье объектом исследования станут современные зарубежные здания и комплексы, бесспорно относящиеся к объектам «устойчивого развития архитектуры» промышленного назначения, но с акцентом на их архитектурном облике. Здания уникальные по разным критериям: по объемным, фасадным и/или планировочным решениям, с нестандартными техническими, идеологическими внедрениями. Рассмотрение, изучение объектов будет происходить с позиции проявления и отражения «устойчивой архитектуры» в архитектурном облике зданий.

Задачи исследования: провести анализ архитектурных решений промышленных объектов, описать характерные особенности фасадных, объемно-планировочных решений, инженерно-конструктивных, влияющие на архитектурно-градостроительный облик; сделать обобщающие выводы. В процессе анализа, не делая акцента на функциональном назначении промышленных предприятий, внимание будет уделено критериям «устойчивой архитектуры». Следующая задача, – определить тенденции в развитии промышленной архитектуры, в том числе, облика объекта, которые формируются с учетом критериев «устойчивого развития архитектуры».

Материалы и методы. Данное исследование базируется на анализе существующих промышленных объектов, построенных за рубежом. Данные объекты являются представителями «устойчивого развития архитектуры», – это главное условие выбора объекта для анализа, а также объекты имеют неповторимый и нестандартный облик, характеризуются яркими концептуальными идеями, получившими отражение в облике здания. Приведенные примеры меняют привычное представление об архитектуре промышленного значения. Попробуем разобраться и выяснить, какие особенности в объекте определили его к «устойчивой архитектуре» и что повлияло на облик объекта. Далее определим, какие принципы устойчивой архитектуры применялись в данных объектах, и какие тенденции намечаются в проектировании промышленной архитектуры.

В архитектуре современных промпредприятий встречаются решения не свойственные типовой промышленной архитектуре, такие как, освоение крыш, использование солнечных батарей, применение современных и инновационных материалов в фасадах, включение дополнительных функций не промышленного значения и так далее. Рассмотрим подробнее на примерах.

Объект 1 (рис. 1). Крупнейшая в мире электростанция в Копенгагене работает на основе мусороперерабатывающего завода, используя вторсырье как топливо для получения электроэнергии.



Рис. 1. Мусороперерабатывающий завод с тепловой электростанцией Copenhill. Копенгаген, Дания. Авторы: Vjarke Ingels Group. 2019 г.

Объект 2 (рис. 2). Основной архитектурной идеей в создании облика электрической подстанции в Иматре перед авторами проекта стояла двойная задача. Сформировать единый комплекс со старым зданием подстанции и органично вписать его в окружающий природный ландшафт. Новое здание подстанции имеет бетонный каркас

и двухслойные фасады. Внешний слой фасада состоит из длинных кирпичей ручной работы, уложенных в зигзагообразном узоре с перфорацией в верхней части для создания пористой решетки, пропускающей свет и воздух, что переключается с треугольными стальными профилями новых опор линий электропередач и терминалов. Внутренний слой фасада состоит из длинных кирпичей ручной работы, уложенных в зигзагообразном узоре с перфорацией в верхней части для создания пористой решетки, пропускающей свет и воздух, что переключается с треугольными стальными профилями новых опор линий электропередач и терминалов. Внутренний слой фасада состоит из длинных кирпичей ручной работы, уложенных в зигзагообразном узоре с перфорацией в верхней части для создания пористой решетки, пропускающей свет и воздух, что переключается с треугольными стальными профилями новых опор линий электропередач и терминалов. Внутренний слой фасада состоит из длинных кирпичей ручной работы, уложенных в зигзагообразном узоре с перфорацией в верхней части для создания пористой решетки, пропускающей свет и воздух, что переключается с треугольными стальными профилями новых опор линий электропередач и терминалов. Внутренний слой фасада состоит из длинных кирпичей ручной работы, уложенных в зигзагообразном узоре с перфорацией в верхней части для создания пористой решетки, пропускающей свет и воздух, что переключается с треугольными стальными профилями новых опор линий электропередач и терминалов.

ренный слой двойного фасада состоит из монолитных и сборных бетонных стен, прорезанных ленточным остеклением. Архитектура придает единую идентичность новому проекту и помещает его в существующий контекст [21, 22]. В

данном проекте архитектура зданий и инженерных сооружений выступает как симбиоз архитектурно-скульптурного подхода в решении облика комплекса. Инфраструктурный объект выполнен в гармонии с окружающей средой.



Рис. 2. Электрическая подстанция. Имаатра, Финляндия. Авторы: бюро Virkkunen & Co. 2020 г.

Объект 3 (рис. 3). В проекте индустриального комплекса по производству текстиля и одежды Integral Esquel изменен традиционный образ текстильного производства. Получился не просто завод-изготовитель, а промышленный парк экотуризма, охватывающий концепции буддизма, со-

хранения экологии и другие элементы устойчивой архитектуры. Кроме строительства основного текстильного производства и ремесленного центра, проект предусматривает создание ботанических садов, плантаций, выставочных залов, ресторанов для персонала, учебных центров и других объектов [23].



Рис. 3. Фабрика Integral компании Esquel. Г. Гуйлинь провинции Гуанси, Китай. Авторы: Ronald Lu & Partners. 2019–2020 гг. Общий вид

В фасадных материалах зданий фабрики Integral Esquel использовались бамбук, синий кирпич, стекло (рис. 4). Большая часть крыши ремесленного центра покрыта зелеными растениями, что не только увеличивает общее зеленое

покрытие участка, но и помогает изолировать здание и поддерживать стабильную температуру в помещениях. Архитектурное решение проекта отличается: многофункциональность, открытость для населения; использование плоскостей крыш,

рельефа; единство с природой, с традициями, что отражается на всем облике комплекса и делает его уникальным. Модель предприятия сочетает в себе современные инновации, технологии и материалы, элементы традиционной культуры и экологическую устойчивость, тем самым пока-

зывая, как производство, природа и человек могут сосуществовать в гармонии. *Проект* также воплотил в себе несколько устойчивых принципов: восстановление земель, рециркуляция воды, пополнение ресурсов, гармонизация и поддержание местной флоры и фауны.



Рис. 4. Фабрика Integral компании Esquel. Г. Гуилинь провинции Гуанси, Китай. Фасад здания

Объект 4 (рис. 5). На мебельной фабрике Vestre, расположенной в лесу рядом с деревней Магнор на востоке Норвегии, воплощены идеи экологической архитектуры: использование местной древесины, низкоуглеродного бетона, размещение солнечных батарей на крыше здания, тепло от производства используется для обогрева помещений. Фабрика употребляет на 90 % меньше энергии и выбрасывает в атмосферу вдвое меньше парниковых газов [24]. Интересно то, что фабрика открыта для туристов. Предусмотрены пешеходные мосты-тропы, идущие от

земли и поднимающиеся на крышу здания. План фабрики имеет форму креста с круглым помещением в центре, которое максимально остеклено и открыто для просмотра посетителей. Многофункциональность, открытость, не стандартное объемно-планировочное решение, эксплуатируемые крыши, использование альтернативных источников энергии, экологичность, «растворение» архитектуры в природной среде, – характерные черты *проекта*.

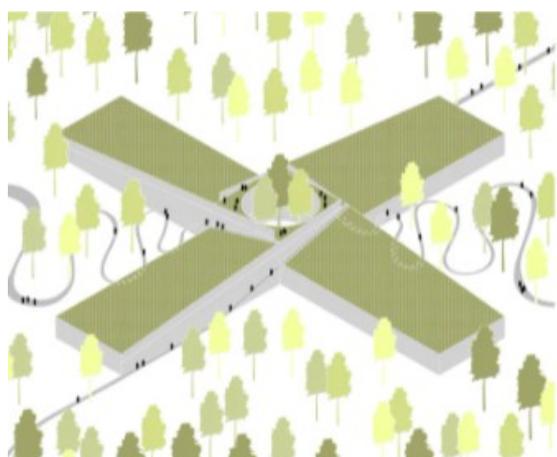


Рис. 5. Мебельная фабрика Vestre. Норвегия. Авторы: бюро BIG. 2020 г.

Объект 5 (рис. 6). Одета из «Лебединого озера» представлена в образе белоснежного лебедя. Поэтому весь замысел архитектурного облика винодельни Odette Estate ассоциируется с белыми лебедиными крыльями. Здание состоит

из трех старых грузовых контейнеров. В одном из них установили пресс для винограда, во втором – офис, в третьем – лабораторию. Не привлекательные стены контейнеров скрыли за белыми полупрозрачными перфорированными панелями, они

маскируют рабочую зону от взгляда посетителей. Фасадные панели и крыша в форме лебединых крыльев определяют оригинальный облик одноэтажного здания. Кровля винодельни «зеленая»,



с естественным озеленением, на крыше расположены солнечные батареи. Устройство солнечных батарей, применение повторно-используемых контейнеров, - винодельня получила сертификат ресурсоэффективности [25].



Рис. 6. Винодельня Odette Estate. США. Авторы: Бюро Signum Architecture. 2017 г.

Объект 6 (рис. 7). Новое сооружение винодельческого производства Шато Шеваль-Блан в регионе Сент-Эмильон включает в себя цех для брожения и выдержки вина и открытые общественные зоны. Вытянутый объем многоуровневой постройки с криволинейным силуэтом вторит холмам окружающей местности. В центре постройки находится внутренний двор, закрытый от солнца и дождя навесным этажом. Во двор привозят собранный виноград, далее он попадает в расположенный на том же уровне цех-бродильню. В подвальном этаже бочки расставлены по кривым линиям, что подчеркивает сложный

план здания. На втором этаже расположен дегустационный зал. Из зала можно попасть на крышу винодельни, занятую деревянной террасой, с полевыми цветами, дикими травами и кустарниками. Свет в интерьер здания попадает сквозь прозрачные стеклянные поверхности террасы [26]. В непосредственной близости находится замок Шеваль-Блан. Волнистый бетонный объем винодельни с зеленой крышей, строгие ряды деревянных панелей и стоек в сочетании с плоскостями стекла, озелененная кровля, нестандартные планировочные решения в сочетании с инновационными производственными технологиями, – отличительные черты винодельни.



Рис. 7. Винодельня Шато Шеваль-Блан, регион Сент-Эмильон, Франция. Арх. Christian de Portzamparc. 2011 г.

Объект 7 (рис. 8). Мусороперерабатывающий завод «МОР» в Майшиме, – облик завода может быть необычным и привлекательным. Оснащение передовыми системами обработки мусора, озелененные крыши, открытые общественные пространства, музей, – появились после

реконструкции завода. Создал образ Фриденсрайх Хундертвассер, – мастер со своим узнаваемым стилем, наполненным формами без единой прямой линии, и страстному защитнику окружающей среды. В процессе переработки отходов вырабатывается электричество. Фасады

красочные и причудливые, напоминают сказочный замок или парк развлечений; 120-ти метровая дымовая труба с золотистым куполом, а на крыше разместился сад. Завод принимает около 12 000 посетителей в год и может считаться туристическим объектом [27]. «Я прикрываю глаза так же, как когда рисую в воображении свои картины, и я вижу дома цвета Dunkelbunt* вместо

уродливого кремового цвета и зеленые луга на всех крышах вместо бетона», – так писал архитектор, живописец и автор завода Хундертвассер, 1979г. (Dunkelbunt* – «сияющие чистотой яркие и глубокие цвета, немного грустные, как во время дождливого дня», – примечание Хундертвассера) [28].



Рис. 8. Мусороперерабатывающий завод «МОР», о. Майшима, Осака, Япония. Фасад и эскиз, арх. Ф. Хундертвассера. 2001 г.

Объект 8 (рис. 9). Производственный центр McLaren расположен в сельской местности на окраине Лондона и состоит из группы зданий и сооружений, главные из которых, это технологический центр и производственное здание, между собой здания соединены подземным переходом. Оба здания выполнены со схожими решениями фасадов, состоящими из алюминиевых труб облицовки и остекления. Производственный центр предназначен для сборки спортивных автомобилей. Технологические процессы и условия труда – на высочайшем уровне, а забота об экологии окружающей среды стояла на первом месте.

Двухэтажное здание завода заглубляется ниже уровня земли и над землей высится не более 6,6 м, здание скрыто за специально высаженными деревьями. На крыше собирается дождевая вода, с последующей очисткой и повторным применением в производстве, а также на крыше будут установлены солнечные батареи. В здании работает ресурсосберегающая система вентиляции [29, 30]. Архитектурные решения объемов, фасадов и градостроительная композиция всего комплекса выглядят необычно, но в тоже время вписываются в ландшафт, не нарушая его восприятие.



Рис. 9. Производственный центр McLaren. Уокинг, Великобритания. Арх. Норман Фостер 2011 г.

Объект 9 (рис. 10). Производственная площадка фармацевтической фирмы Kirsch Pharma

Health Care состоит из административно-офисного здания и производственного корпуса. Площадка расположена на территории со свободным

ландшафтом. Комплекс становится стартовым объектом в данной местности. Производственный корпус простой прямоугольной формы, удобной для производственных процессов. Фасадная отделка из навесных светло-серых кассетных панелей, с наклонной «разрезкой». Выделенные швы между панелями темно-серого цвета в вечернее и ночное время с подсветкой. Задача административного корпуса – стать представительским, презентабельным и привлечь внимание посетителей [31]. Прямоугольное в плане здание выглядит необычно за счет решения кровли. Кровля состоит из разноформатных серых сегментов-ромбов с покрытием из титан-цинка, спускается к земле и соприкасается с остекленными виражами стен. Сложная геометрия кровли запроектирована с помощью 3Д-моделирования. Несколько стыков также имеют подсветку. При такой ломаной крыше в здании предусмотрен внутренний водосток. Нижняя облицовка кровли и на улице, и в помещении выполнена из красных трапециевидных панелей. Данные цвета и

наклонные направляющие в архконцепции комплекса были выбраны в соответствии с логотипом компании. Острые углы и ромбы административного здания, наклонное расположение навесные панели производственного корпуса создают ансамбль в едином стиле [32]. Фасадные материалы долговечны, не требуют ухода во время эксплуатации, и отвечают самым высоким требованиям экологичного строительства; свободная градостроительная ситуация позволит в будущем расширить промзону; технология производства на высоком инновационном уровне. В отношении потребления таких ресурсов, как вода и энергия, был реализован целый комплекс мер по поддержанию эффективного и ресурсосберегающего объекта. Технология управления зданием сводит к минимуму потребление энергии, например, за счет последовательного использования рекуперации тепла. Часть электроэнергии производят на собственной блочной теплоэлектростанции [33].



Рис. 10. Здание головного офиса и производство фармацевтической компании Kirsch Pharma HealthCare GmbH в г. Ведемарке, Германия. Авторы: бюро SAOTA. 2018 г.

Объект 10 (рис. 11). Производственный и научно-инновационный центр L'Oréal расположен на берегу залива. Работа центра основана на возобновляемых источниках энергии. Вытянутый вдоль береговой линии объем здания с плавными формами, главным остекленным фасадом обращен в сторону залива. Комплексный подход в проектировании здания, сооружений и организации самой территории предусматривает ряд архитектурно-конструктивных, инженерных решений, направленных на сокращение влияния на экосистему и потребление ресурсов. Применено покрытие кровли из фотоэлектрических панелей с эффектом солнечных батарей, с системой датчиков для поддержания микроклимата внутри здания, в здании предусмотрена система перекрестной вентиляции. Мощная фильтрация воды создает нулевое воздействие на экологию. Первый этаж выполнен в каркасе с тремя параллельными рядами колонн, на половину открыт и

предусмотрен для автостоянки, также содержит не освещенную зону технических и складских помещений. Основной объем здания консольно выдвинут над первым этажом. Второй этаж выполнен из металлической коробчатой балки, внутри которой находится антресоль третьего уровня. Антресоль опирается на колонны, стоящие на нижней плите коробчатой балки. Большую часть второго и третьего этажей занимают лаборатории и исследовательские модули, остальную часть – административные помещения, конференцзалы, залы совещаний, ресторан. В центре предусмотрен кампус для временного проживания. На территории восстановлен естественный заповедник с созданием холмистого рельефа, который помогает замаскировать систему очистных сооружений в обваловке [34]. Симбиоз принятых мер создает благоприятную, экологически чистую среду.

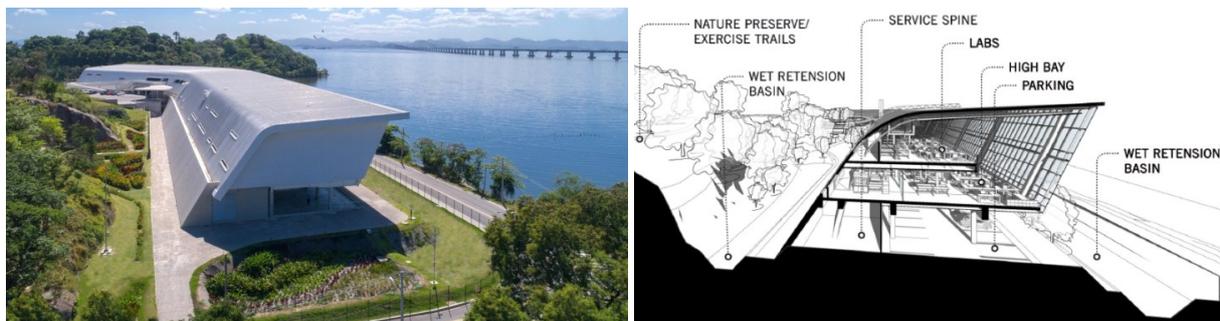


Рис. 11. Производственный и научно-инновационный центр L'Oréal. Рио-де-Жанейро, Бразилия.

Авторы: Perkins&Will. 2016 г.

Основная часть. В архитектуре современных промышленных объектов встречаются интересные и смелые решения, которые касаются внешнего архитектурного облика и планировочных решений, а также несут новаторские идеи по технологическому оснащению, оборудованию. Комплекс архитектурных, инженерно-конструктивных решений приводит к успешному результату, – это безопасность и комфорт работающих

и посетителей, экологическая безопасность, энергоресурсосбережение и автономность частичная или полная в работе предприятия и так далее, а также *запоминающийся и привлекательный облик*. Рассмотрим особенности архитектурных решений по различным критериям в таблице 1.

Таблица 1

Характерные черты и особенности рассмотренных объектов

№	Критерии	Характерные черты и особенности
1	<p><i>Планировочные особенности</i></p> <p>Дополнительные функции</p>	<p>Многофункциональное общественное пространство, открытое для общего доступа населения, туристический объект:</p> <ul style="list-style-type: none"> - общественный парк, образовательный центр, кафе, развлекательные функции, музей, выставочные залы/пространства, учебные центры (как для персонала, так и для посетителей), смотровая площадка, - спорт (скалолазание, искусственный лыжный склон), - экотуризм, промышленный туризм, ботанические сады и плантации <p>Внутренние двory; заглубление здания ниже уровня земли, подземные переходы, сады/парки/террасы на кровле, антресольные этажи, консольные этажи.</p>
2	<p><i>Особенности облика здания</i></p> <p>Объем, фасады</p>	<p>Криволинейные объекты (5, 6, 7, 10), не стандартные формы/объемы (1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10). Фасад – стена для скалолазания.</p> <p>Кровля: инженерно-технологическая функция (солнечные батареи, датчики, устройства, оборудование), «зеленая» кровля, эксплуатируемая крыша, эстетически привлекательный «пятый фасад здания» (1-10).</p>
4	<p><i>Градостроительная ситуация</i></p>	<p>В границах города (1, 7). Визуально доминантный объект в существующей ситуации (1, 3, 9). В природном ландшафте (2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10)</p>
5	<p><i>Материалы отделки</i></p>	<p>Панели: перфорированные, решетчатые, кассетные; навесные системы, «двойные» фасады, инновационные материалы с различными свойствами, задействованными в общей системе получения и сбережения тепла, в системе вентиляции, - создание микроклимата.</p> <p>Дерево (в том числе, местная древесина), бамбук, стекло, бетон (переход на низкоуглеродистый цемент*), кирпич, титаново-цинковое покрытие, керамопласт, архитектурный бетон, сэндвич-панели, фибробетонные панели («фиброцементные» панели), фасадные материалы «под дерево», современные композитные материалы. Использование вторичной арматурной стали (4). Грузовые контейнеры (вторичное использование). Искусственные отделочные материалы, которые не требуют ухода в эксплуатации и с нулевым воздействием на экологию.</p>
6	<p><i>Инженерно-технологические особенности</i></p> <p>Технологии, инновации, инженерные системы</p>	<p>Работа на вторсырье или с использованием вторсырья. Получение электроэнергии на основе собственного производства.</p> <p>Инновационные технологии очистных сооружений по очистке отходов, воздуха от газов и примесей, фильтрации воды.</p> <p>Без вредных выбросов в атмосферу, отсутствие или минимальное потребление природных ресурсов. Возобновляемые источники энергии. Солнечные батареи. Ресурсосберегающая система вентиляции.</p> <p>Специализированное компьютерное программирование на стадии проектирования и эксплуатации здания (1-10).</p> <p>Современные технологии производства с минимальным воздействием на окружающую среду или его отсутствием, - экологически чистые производства.</p> <p>Восстановление земель, рециркуляция воды, пополнение ресурсов, рекуперация тепла, гармонизация и поддержание местной флоры и фауны.</p>

* низкоуглеродистый цемент – производство которого сопровождается низким потреблением энергии и низким выделением углерода

Можно сделать следующие выводы по проведенному анализу объектов. Все объекты имеют индивидуальный, неповторимый облик, когда можно сказать, что данный облик промышленных объектов стал «другим», отличающимся от аналогичных объектов прошлой эпохи.

1. *Архитектурный облик промышленного здания* кардинально меняется. Мы видим архитектурные решения, необычные и несвойственные промышленной архитектуре. Несомненно, облик здания должен отражать и отвечать функции здания. Но что происходит сейчас? Архитектура промышленного здания напоминает и приближается к архитектуре общественного здания. Человек привык к той архитектуре, которая его окружает в повседневной жизни, а это офисные и административные здания, торговые центры, многофункциональные комплексы. Такая архитектура его не пугает, от нее не исходит угрозы и опасности, как от чистого образа промпредприятия, запечатленного в нашей памяти. Внешний облик нарочито отходит от идентификации промышленной архитектуры. Появляются объекты со схожими архитектурными чертами туристических, общественно-развлекательных комплексов, любопытные «инопланетные», космические образы.

Спектр проектных средств, применяемых для достижения данного эффекта, многогранен. В отделке фасадов применяют два вида материалов: искусственные материалы, которые не требуют ухода в эксплуатации, а также инновационные материалы на основе различных сплавов – композитные и натуральные материалы. Сочетание различных материалов и систем фасадной отделки, – эксперименты, которые раньше были не типичны для промышленной архитектуры. Причем, главные требования к любым материалам – нулевое воздействие на экологию и на человека; огнестойкость и негорючесть. Во многих объектах задействован «пятый» фасад здания, работающий на создание облика, архитектуры здания в целом; «зеленые кровли» – создание искусственного ландшафта с естественным озеленением. Эксплуатируемые кровли для отдыха, как для работающего персонала, так и для посетителей предприятия.

Очень четко видны *тенденции в решении объемов, фасадов*, зависящие от существующих градостроительных условий. Первое, это максимально гармонично вписаться в окружающий ландшафт. Не навредить визуальной восприимчивости природы, местности. Здания «повторяют» форму рельефа, – холмы, растительность, водоемы. При наличии свободной территории здание может «уходить» в подземные этажи, заглубляться, с целью сохранить небольшую высоту

возводимых объектов и максимальное внимание сфокусировать на ландшафте. Второе направление, это здания – доминанты. С уникальной и даже с «причудливой» или с «космической» архитектурой. Как вариант, это создание скульптурной архитектуры, задающей будущую идентичность, узнаваемость места. Совсем иной подход при реконструкции, пристройки, расширении, модернизации и так далее, то есть, при наличии существующих корпусов. Добиться максимального сочетания с существующими корпусами, сооружениями.

2. *Планировочные решения* уходят от типизации проектных решений. Особенно, это касается общественных зон и пространств, корпусов не производственного назначения. Практически во всех рассмотренных зданиях характерна многофункциональность. Раскрытие предприятия для населения, города. Расширение функций и уход от «закрытого» производства.

На предприятии предусмотрены лаборатории, научные и экспериментальные отделы, обучающие центры, библиотеки, конференц-залы, медиапространства, места отдыха и общения персонала, где происходит обмен опытом, знаниями, информацией между рабочими, научными сотрудниками, а также отдых, разгрузка и комфорт на рабочем месте.

3. *Инновации и наука в технологии и производстве, инженерное оборудование.*

Применение научных разработок, программирования при создании энергоэффективных проектов.

4. *Компьютерное программирование.* Архитектурно-конструктивное программирование: разновеликие и сложные формы, многоуровневые объемы; применение нетиповых конструктивных систем и конструкций. Без инженерного, технологического программирования сегодня нельзя представить работу промпредприятия. Пространственное и математическое моделирование объема здания в зависимости от жизненного цикла, прогнозирование с моделированием процессов.

Выводы. Аккумулируя проведенный анализ и вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

1. В современной промышленной архитектуре прослеживается тенденция к выполнению критериев «устойчивого развития архитектуры»: использование энергоэффективных систем, в том числе, на основе естественных источников энергии; бережное отношение к окружающей среде, неприемлемость ее загрязнения; использование инновационных технологий и современных строительных и отделочных материалов. Инновационные научные разработки, компьютеризация и

программирование, - обязательные инструменты для достижения успешных результатов.

Особое внимание уделяется безопасности. Безопасность для населения и работающего персонала, безопасность экологии, окружающей среды. Целый комплекс мер: по применению огнестойких конструкций, негорючих материалов, строительство очистных сооружений по очистке воздуха, фильтрации стоков, воды. Санитарно-защитные зоны для промпредприятий (СЗЗ) утвержденные нормами СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов», предназначены для создания поясов защиты населения от промпредприятия. Самые распространенные зоны «отчуждения» для промпредприятий установлены в 500 и 1000 метров. Устанавливая такие защитные зоны в метрах, километрах, тем самым мы констатируем факт того, что данное предприятие априори имеет вредное, опасное производство. Лучше устанавливать требования по выбросам, предельным значениям загрязнения окружающей среды. И если определять зоны СЗЗ, то в зависимости от просчитанного количества и качества данных выбросов и степени защиты от них у каждого конкретного предприятия.

2. Общая тенденция – гуманизация промышленной архитектуры. Способы достижения различны: частичный отход от типизации, унификации, стандартизации архитектурных решений, в тех случаях, когда это не противоречит производственному процессу; многофункциональность и отход от «закрытого» производства, как внутри промобъекта, так и раскрытие для населения; использование архитектурного облика, с «размытыми» типологическими чертами промышленной архитектуры в сторону облика общественного объекта. Одноэтажные корпуса в приоритете, но имеют места быть здания любой этажности, все зависит от производственных процессов внутри корпусов.

3. В основном, применение конструктивных систем с большепролетным каркасом в металле или железобетонные несущие конструкции, а также приветствуются любые решения, конструктивно-технологически и экономически выгодные и дающие гибкую планировочную структуру, которая в будущем позволит беспрепятственно менять технологическое оборудование и проводить перепланировку. В связи с этим, желательно, чтобы технологическое оборудование не было связано с несущими конструкциями здания.

Несомненно, принадлежность объекта к «устойчивой архитектуре» опирается на комплекс различных мер, в том числе, по техноло-

гии, применении энергоэффективных материалов, альтернативных источников энергии, на мощных очистительных сооружениях и других инженерных системах. В эту общую работу включаются планировочные решения, решения по фасадам и объемам здания. Уникальность фасадов, объемов, не стандартные решения идейно-планировочного характера также становятся визитной карточкой «устойчивого развития архитектуры». Современные архитекторы должны об этом не забывать в своих проектах. Научно-технологический прогресс в промышленной сфере и реальное прикладное проектирование должны идти вместе и в ногу с происходящими переменами. В заключении хотелось бы отметить, что изменения в современной промышленной сфере, в том числе, в архитектурной области, несомненно, радуют, есть все предпосылки для развития и становления «устойчивой архитектуры» и в России. Данные тенденции в «развитии устойчивой архитектуры» станут вектором в проектировании не только при возведении новых производственных объектов, но и при реновации существующих.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сазыкина Е.В. Пути развития современного производства России и их влияние на практику архитектурного проектирования // *Architecture and modern information technologies*. 2016. №1(34). С. 1–10
2. Чистяков К.Ю. Типологические признаки современной промышленной архитектуры // *Системные технологии*, 2019. № 3 (№32). С. 76–83
3. Sampaio C.G., Alvar Aalto and Alvaro Siza: The Link between Architecture and Nature in the Construction of Place // *Athens Journal of Architecture*. 2015. Vol.1. №. 3. Pp. 207–220
4. Сазыкина Е.В. Особенности архитектурно-планировочной организации производственных предприятий в условиях современного города // *Architecture and modern information technologies*, 2017. № 1 (38). С. 213–224
5. *Industrial Buildings. Conservation and Regeneration* // ed. by M. Stratton. – New York, Taylor & Francis e-Library. 2000. Vol. 5. 256 p.
6. Дмитриева А.О., Хрусталева А.А. Функциональное зонирование и архитектурные решения современных производственных предприятий // *Системные технологии*. 2019. № 2 (№32). С. 103–111
7. Дмитриева А.О. Принципы объемно-планировочной организации новейших производственных объектов // *Architecture and modern information technologies*, 2019. № 2 (47). С. 135–149
8. Дмитриева А.О. Многоаспектная гибкость архитектуры современных производственных

предприятий // Сборник статей «Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ», Москва: Изд-во МАРХИ. 2021. Вып.1. С. 211–214. DOI: 10.24412/cl-35672-2021-1-0047

9. Дмитриева А.О. Влияние «прорывных технологий» на архитектуру высокотехнологичных производственных объектов // Национальная ассоциация ученых (НАУ), 2020. №61. С. 4-6 DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.61.314

10. Проскурин Г.А. Современные принципы построения промышленных зданий // Вестник ОГУ, 2011. № 9 (128). С. 170–177. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.61.314

11. Shamaeva T. Space planning solutions of production and warehouse buildings and complexes as exemplified by the Istra District of the Moscow Region // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10(2). Pp. 1719–1732

12. Есаулов Г.В. Устойчивая архитектура – от принципов к стратегии развития // Вестник ТГАСУ. 2014. №6. С. 9–24

13. Фетисова М.А., Коломыцева А.Ю. Гибкий подход к проектированию производственного объекта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. №2. С.47–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-47-54

14. Кологривова Л.Б. Экологичная энергетика в архитектуре современного производственного здания // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2013. № 2. С. 73-75 DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.61.314

15. Фисенко А.А., Бассе М.Е. Энергоэффективность промышленной архитектуры: современная теория и практика // Architecture and modern information technologies. 2013. № 2 (23). С. 1–13

16. Bell D. The coming of post-industrial society: A venture of social forecasting. The future of industrial buildings by Nicholas Grimshaw // Journal of the Royal Society of Arts. Vol. 133. №5341 (December 1984) С. 47–602.

17. Fei S., Shuwei G., Borui L., Yichao L., Sailing H. An Acoustic Metamaterial Lens for Acoustic Point-to-Point Communication in Air // Akustic journal. 2019. Vol. 65. No. 1. Pp. 1–6.

18. Конюков А.Г., Москаева А.Г. Открытая система архитектурной унификация как способ совершенствования процесса проектирования производственных зданий // Architecture and modern information technologies. 2013. № 1 (22). С. 1–12

19. Конюхов А.Г. Метод свободного проектирования производственных зданий и архитектурно-строительная унификация // Известия КГАСУ. 2013. №2 (24). С. 60–69

20. Тепловая электростанция с лыжным склоном на крыше – архитектура будущего от Bjarke Ingels Group. [Электронный ресурс]. Ru.Architime. URL: https://www.architime.ru/news/big_1/copenhill.htm#5.jpg. (дата обращения: 01.08.2022)

21. Электрическая подстанция Иматы / Virkkunen@Co Frchitects. [Электронный ресурс]. decor.design. URL: <https://decor.design/elektricheskaya-podstancziya-imatry-virkkunen-co-architects/> (дата обращения: 01.08.2022)

22. Virkkunen@Co проектирует скульптурные подстанции и пилоны в Финляндии. [Электронный ресурс]. decor.design. URL: <https://decor.design/virkkunen-co-proektiruet-skulpturnye-podstanczii-i-pilony-v-finlyandii/> (дата обращения: 01.08.2022)

23. Новая промышленная архитектура: необычные проекты. [Электронный ресурс]. Главгосэкспертиза России. URL: <https://zen.yandex.ru/media/glavgosexpertiza/novaia-promyshlennaiia-arhitektura-neobychnye-proekty-5fa12dae49e00863eb6d112c> (дата обращения: 01.08.2022)

24. BIG Creates Sustainable Furniture Factory For Vestre In The Heart Of The Norwegian Forest. [Электронный ресурс]. worldarchitecture.org. URL: <https://worldarchitecture.org/architecture-news/effng/big-creates-sustainable-furniture-factory-for-vestre-in-the-heart-of-the-norwegian-forest.html> (дата обращения: 01.08.2022)

25. Odette Estate Winery // Signum Architecture. [Электронный ресурс]. architizer.com. URL: <https://architizer.com/blog/projects/odette-estate-winery/> (дата обращения: 01.08.2022)

26. Бетонные волны в виноградниках. [Электронный ресурс]. archi.ru. URL: <https://archi.ru/world/35179/betonnye-volny-v-vinogradnikah> (дата обращения: 01.08.2022)

27. Фриденсрайх Хундертвассер: Завод по сжиганию мусора MOP Maishima. [Электронный ресурс]. Архитектура и Проектирование | Справочник. URL: <http://arx.novosibdom.ru/node/1804> (дата обращения: 01.08.2022)

28. Фриденсрайх Хундертвассер – Философия/тексты. Я прикрываю глаза..., 1979. [Электронный ресурс]. hundertwasser.ru. URL: https://hundertwasser.ru/philosophy/pages/1979--I_Close_My_Eyes_Halfway--RUS--Hundertwasser.html (дата обращения: 01.08.2022)

29. Новый этап эволюции завода. [Электронный ресурс]. Архи Ру. URL: <https://archi.ru/world/37968/novyi-etap-evolyucii-zavoda> (дата обращения: 01.08.2022)

30. Уникальный производственный центр McLaren в Лондоне. [Электронный ресурс]. Европа сегодня. URL: [58](https://europe-</p></div><div data-bbox=)

today.ru/2011/11/unikalnyj-proizvodstvennyj-centr-mclaren-v-londone/ (дата обращения: 01.08.2022)

31. Головной офис и производство Kirsch Pharma HealthCare GmbH in Wedemark, Germany. [Электронный ресурс]. Интернет-журнал о дизайне и архитектуре BERLOGOS. URL: <http://berlogos.ru/work/golovnoj-ofis-i-proizvodstvo-kirsch-pharma-healthcare-gmbh-v-vedemarke-germaniya/> (дата обращения: 01.08.2022)

32. Необычная кровля на здании фармацевтической компании KirschPharma HealthCare. [Электронный ресурс]. Архи Ру. URL: <https://archi.ru/tech/87587/neobychnaya-krovlya-na-zdanii-farmaceuticheskoj-kompanii->

kirschpharma-healthcare (дата обращения: 01.08.2022)

33. Environment and sustainability. [Электронный ресурс]. Kirschpharma-healthcare. URL: <https://www.kirschpharma-healthcare.com/#!de/kirsch-pharma-healthcare/unternehmen-umwelt-und-nachhaltigkeit> (дата обращения: 01.08.2022)

34. Инновационный центр L'Oreal/Перкинс и Уилл. [Электронный ресурс]. archdaily.com URL: https://www.archdaily.com/938562/loreal-innovation-center-perkins-and-will?ad_source=search&ad_medium=projects_tab (дата обращения: 01.08.2022)

Информация об авторах

Шамаева Татьяна Вячеславовна, кандидат архитектуры, доцент кафедры Архитектура. E-mail: ShamaevaTV@yandex.ru. Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет (НИУ МГСУ). Россия, 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26.

Поступила 11.08.2022 г.

© Шамаева Т.В., 2022

Shamaeva T.V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

E-mail: ShamaevaTV@yandex.ru

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURAL APPEARANCE OF INDUSTRIAL FACILITIES ON THE EXAMPLE OF FOREIGN EXPERIENCE

Abstract. *The industry is at a new qualitative stage of its development. The prerequisites for the transition to a new stage are the following: the development of science, the use of modern technologies, innovations, materials, computerization and programming. The architecture of modern industrial buildings is the object of research. The architectural appearance of "sustainable architecture" for industrial purposes is poorly studied. The characteristic features of architectural solutions are studied. They helped to achieve the belonging of the object to the "sustainable architecture", including in the decisions of the appearance of the industrial facility. Volumes, facades, basic planning ideas affecting the volume and appearance of the object are analyzed. Conclusions are formulated. Attitude towards industry of architecture and towards architecture of industrial buildings are changing. A general trend has been identified – this is the humanization of industrial architecture: a partial departure from the standardization of architectural solutions; multifunctionality; a departure from "closed" production; the appearance of a building with "blurred" typological features of industrial architecture, a shift towards the appearance of a public object. The tendencies to fulfill the criteria of "sustainable development of architecture" are formulated: the use of alternative sources of electricity, innovative technologies and building materials; the active use of scientific developments; computerization and programming. Special attention is paid to safety for the population and working personnel, environmental safety. A set of measures is being taken to achieve safety, including the use of architectural and structural solutions. The originality of facades, volumes, non-standard solutions of an ideological and planning nature also become the hallmark of the "sustainable development of architecture".*

Keywords: *architectural appearance, innovative ideas in architecture, environmental safety, energy-efficient projects.*

REFERENCES

1. Sazykina E. Development path of contemporary russian manufacturing and their impact on practice in the architectural design [Puti razvitiya sov-

remennogo proizvodstva rossii i ih vliyanie na praktiku arhitekturnogo proektirovaniya] Architecture and modern information technologies. 2016. No. 1(34). Pp. 1–10. (rus)

2. Chistyakov K. The typical signs of modern industrial architecture [Tipologicheskie priznaki

sovremennoy promyshlennoy arhitektury]. The system technologies. 2019. No 3 (No. 32). Pp. 76–83 (rus)

3. Sampaio C.G., Alvar Aalto and Alvaro Siza: The Link between Architecture and Nature in the Construction of Place. Athens Journal of Architecture. 2015. Vol.1. No. 3. Pp. 207–220.

4. Sazykina E. Architectural and planning organization features of industrial facilities in the contemporary urban structures [Osobennosti arhitekturno planirovochnoy organizatsii proizvodstvennykh predpriyatiy v usloviyakh sovremennogo goroda]. Architecture and modern information technologies. 2017. No 1 (38). Pp. 213–224. (rus)

5. Industrial Buildings. Conservation and Regeneration. Ed. by M. Stratton. New York, Taylor & Francis e-Library. 2000. Vol. 5. 256 p

6. Dmitrieva A., Khrustalev A. Functional zoning and architectural design of contemporary industrial facilities [Funktionalnoe zonirovaniye i arhitekturnye resheniya sovremennykh proizvodstvennykh predpriyatiy]. The system technologies. 2019. No. 2 (No. 32). Pp. 103–111 (rus)

7. Dmitrieva A. Principles of space-planning organization of the recent production facilities [Printsipy obemno planirovochnoy organizatsii novyeyshih proizvodstvennykh obektov]. Architecture and modern information technologies. 2019. No. 2 (47). Pp. 135–149 (rus)

8. Dmitrieva A.O. Multi-aspect flexibility of the architecture of modern industrial facilities [Mnogospektynaya gibkost arhitektury sovremennykh proizvodstvennykh predpriyatiy]. Collected articles «Science, education and experimental design. Proceedings of the MARCHI», Moscow: Publishing house MARCHI. 2021. Vol. 1. Pp. 211–214. DOI: 10.24412/cl-35672-2021-1-0047 (rus)

9. Dmitrieva A. Impact of "breakthrough technologies" on the architecture of high-tech production facilities [Vliyaniye proryvnykh tehnologiy na arhitekturu vysokotekhnologichnykh proizvodstvennykh obektov]. National Association of Scientists. 2020. No. 61. Pp. 4–6. DOI:10.31618/nas.2413-5291.2020.1.61.314 (rus)

10. Proskurin G.A. Modern principles of building construction [Sovremennyye printsipy postroeniya promishlennykh zdaniy]. Vestnik OSU. 2011. No. 9(128). Pp. 170–177. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.61.314 (rus)

11. Shamaeva T. Space planning solutions of production and warehouse buildings and complexes as exemplified by the Istra District of the Moscow Region. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Vol. 10(2). Pp. 1719–1732

12. Esaulov G. Sustainable architecture: from approaches to strategy of development [Ustoychivaya arhitektura ot printsipov k strategii razvitiya]. Vestnik TGASU. 2014. No. 6. Pp. 9–24 (rus)

13. Fetisova M.A., Kolomytseva A.Yu. Flexible approach to design of a production facility [Razrabotka metodov i sredstv planirovaniya proizvodstvennykh protsessov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 2. Pp. 47–54. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-47-54 (rus)

14. Kologrivova L.B. Eco-friendly energy in the architecture of modern industrial building [Ekologichnaya energetika v arhitekture sovremennogo proizvodstvennogo zdaniya]. Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN. 2013. No 2. Pp. 73–75. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.61.314 (rus)

15. Fissenko A.A., Basse M.E. Energy efficiency of industrial architecture: modern theory and practice [Energoeffektivnost promyshlennoy arhitektury sovremennaya teoriya i praktika]. Architecture and modern information technologies. 2013. No 2 (23). Pp. 1–13 (rus)

16. Bell D. The coming of post-industrial society: A venture of social forecasting. The future of industrial buildings by Nicholas Grimshaw. Journal of the Royal Society of Arts. Vol. 133, no. 5341 (December 1984), Pp. 47–602.

17. Fei S., Shuwei G., Borui L., Yichao L., Sailing. H. An Acoustic Metamaterial Lens for Acoustic Point-to-Point Communication in Air. Akustic journal. 2019. Vol. 65. No. 1. Pp. 1–6.

18. Konyukov A.G., Moskaeva A.S. Open system of architectural unification as the way of improvement methods of designing of industrial buildings. [Otkrytaya Sistema arhitekturnoy unifikatsii kak sposob sovershenstvovaniya protsessa proektirovaniya proizvodstvennykh zdaniy]. Architecture and modern information technologies. 2013. No 1 (22). Pp. 1–12 (rus)

19. Konyukov A. The method of free design of manufacture buildings and the architectural-construction unification [Metod svobodnogo proektirovaniya proizvodstvennykh zdaniy i arhitekturno stroitel'naya unifikatsiya]. News of the KSUAE, 2013. No 2 (24). Pp. 60–69 (rus)

20. Thermal power plant with a ski slope on the roof – architecture of the future by Bjarke Ingels Group. [Teplovaya elektrostanciya s lyzhnym sklonom na kryshe – arhitektura budushchego ot Bjarke Ingels Group]. Ru.Architime. URL: https://www.architime.ru/news/big_1/copenhill.htm#5.jpg. (date of treatment: 01.08.2022)

21. Imatra Electrical Substation / Virkkunen@Co Architects. [Elektricheskaya podstanciya Imatry / Virkkunen@Co Architects]. decor.design. URL: <https://decor.design/elektricheskaya-podstanciya-imatry-virkkunen-co-architects/> (date of treatment: 01.08.2022)

22. Virkkunen@Co designs sculptural substations and pylons in Finland. [Virkkunen@Co proektiruet skulpturnye podstancii i pilony v Finlyandii].

decor.design. URL: [decor.design https://decor.design/virkkunen-co-proektiruet-skulpturnye-podstanczii-i-pilony-v-finlyandii/](https://decor.design/virkkunen-co-proektiruet-skulpturnye-podstanczii-i-pilony-v-finlyandii/) (date of treatment: 01.08.2022)

23. New industrial architecture: unusual projects. [Novaya promyshlennaya arhitektura: neobychnye proekty]. Glavgosexpertiza of Russia. URL: <https://zen.yandex.ru/media/glavgosexpertiza/novaia-promyshlennaia-arhitektura-neobychnye-proekty-5fa12dae49e00863eb6d112c> (date of treatment: 01.08.2022)

24. BIG Creates Sustainable Furniture Factory For Vestre In The Heart Of The Norwegian Forest. worldarchitecture.org. URL: <https://worldarchitecture.org/architecture-news/effng/big-creates-sustainable-furniture-factory-for-vestre-in-the-heart-of-the-norwegian-forest.html> (date of treatment: 01.08.2022)

25. Odette Estate Winery. Signum Architecture. architizer.com. URL: <https://architizer.com/blog/projects/odette-estate-winery/> (date of treatment: 01.08.2022)

26. Concrete waves in vineyards. [Betonnye volny v vinogradnikah]. archi.ru. URL: <https://archi.ru/world/35179/betonnye-volny-v-vinogradnikah> (date of treatment: 01.08.2022)

27. Friedensreich Hundertwasser: Incinerator plant MOP Maishima. [Zavod po szhiganiyu mutora]. Architecture and Design | Guide. URL: <http://arx.novosibdom.ru/node/1804> (date of treatment: 01.08.2022)

28. Friedensreich Hundertwasser – Philosophy/texts. I_Close_My_Eyes ..., 1979. hundertwasser.ru. URL: https://hundertwasser.ru/philosophy/pages/1979--I_Close_My_Eyes_Halfway--RUS--Hundertwasser.html (date of treatment: 01.08.2022)

Information about the authors

Shamaeva, Tatiana V. PhD. E-mail: ShamaevaTV@yandex.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.

Received 11.08.2022

Для цитирования:

Шамаева Т.В. Устойчивое развитие архитектурного облика промышленных объектов на примере зарубежного опыта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61

For citation:

Shamaeva T.V. Sustainable development of the architectural appearance of industrial facilities on the example of foreign experience. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61

29. The new stage in the evolution of the factory. [Novyj etap evolyucii zavoda]. Arhi Ru. URL: <https://archi.ru/world/37968/novyi-etap-evolyucii-zavoda> (date of treatment: 01.08.2022)

30. Unique production center McLaren in London. [Unikal'nyj proizvodstvennyj centr McLaren v Londone]. Europe today. URL: <https://europe-today.ru/2011/11/unikalnyj-proizvodstvennyj-centr-mclaren-v-londone/> (date of treatment: 01.08.2022)

31. Head office and production Kirsch Pharma HealthCare GmbH - [Golovnoj ofis i proizvodstvo Kirsch Pharma HealthCare GmbH v Vedemarke, Germaniya.]. Online magazine about design and architecture BERLOGOS. URL: <http://berlogos.ru/work/golovnoj-ofis-i-proizvodstvo-kirsch-pharma-healthcare-gmbh-v-vedemarke-germaniya/> (date of treatment: 01.08.2022)

32. Unusual roof on the pharmaceutical company building KirschPharma HealthCare. [Neobychnaya krovlya na zdanii farmacevticheskoi kompanii KirschPharma HealthCare]. Arhi Ru. — URL: <https://archi.ru/tech/87587/neobychnaya-krovlya-na-zdanii-farmaceuticheskoi-kompanii-kirschpharma-healthcare> (date of treatment: 01.08.2022)

33. Environment and sustainability. Kirschpharma-healthcare. URL: <https://www.kirschpharma-healthcare.com/#!de/kirsch-pharma-healthcare/unternehmen-umwelt-und-nachhaltigkeit> (date of treatment: 01.08.2022)

34. Innovation Center L'Oreal/ Perkins&Will. [Innovacionnyj centr / L'Oreal/ Perkins&Will]. archdaily.com URL: https://www.archdaily.com/938562/loreal-innovation-center-perkins-and-will?ad_source=search&ad_medium=projects_tab (date of treatment: 01.08.2022)

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-62-74

¹Перцев В.В., ^{1,2,*}Ладик Е.И., ¹Дребезгова М.Ю., ¹Пампущенко А.Ю.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖИЛИЩНОГО ФОНДА ПЕРВЫХ МАССОВЫХ СЕРИЙ ЗАСТРОЙКИ ГОРОДА БЕЛГОРОДА

Аннотация. В статье рассмотрена типология жилищного фонда массовых серий застройки на примере г. Белгорода. Представлены данные о ее классификациях: по форме собственности, целям использования, планировочной структуре, конструктивным особенностям. Проанализированы исторические архивные данные, касающиеся развития жилищного фонда г. Белгорода. Выделены основные этапы развития жилой застройки массовых серий города Белгорода: с 1945 по 1964 гг. – период восстановления города после военных действий и начало развития массового жилищного строительства; с 1964 по 1980е гг. – период активного строительства массового жилищного фонда; 1980е гг. – н.в. – современный период. Каждый временной период изучен по ряду факторов: численности населения, площади застройки, этажности, материалам строительства, планировочным решениям многоквартирных жилых домов и т. д. Рассмотрена последовательность формирования и развития жилой застройки массовых серий в структуре города Белгорода и ближайших населенных пунктов. Проанализировано современное состояние жилищного фонда первых массовых серий в структуре застройки г. Белгорода. Выделены характерные типы территорий жилой застройки и перспективные направления реновации жилой застройки первых массовых серий. г. Белгорода.

Ключевые слова: жилищный фонд, жилая застройка, массовые серии жилой застройки, типология жилой застройки, территории жилой застройки

Введение. На сегодняшний день доля жилых домов первых массовых серий пятиэтажной застройки составляет от 10 до 20 % в большинстве региональных центров Российской Федерации [1]. Большая часть жилых домов первых массовых серий подвержена физическому и моральному износу и требует реконструкции либо реновации. В 2020 г. был принят Федеральный закон «О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях обеспечения комплексного развития территорий» от 30.12.2020 N 494-ФЗ. Принятие закона вызвано острой необходимостью обновления существующей жилой среды. В указанном законе вводится понятие КРТ (комплексное развитие территорий) с целью установления порядка сноса ветхого многоквартирного жилья, улучшения условий проживания населения и повышения качества городской среды.

Зачастую панельная жилая застройка массовых серий занимает значительную площадь в структуре центральных районов крупных городов, обеспеченных развитой транспортной, инженерной и социальной инфраструктурой. Плотность застройки данных территорий в 1,5–2 раза ниже действующих нормативов, в тоже время в большинстве региональных центров РФ наблюдается нехватка территориальных ресурсов в черте города. Новое жилищное строительство ведется за счет расширения пригородной зоны и отчуждения сельскохозяйственных территорий,

что ведет к увеличению маятниковых миграций населения и значительно увеличивает нагрузку на дорожно-транспортную сеть. Сложившаяся ситуация требует разработки региональных сценариев реновации территорий жилой застройки первых массовых серий [2–6].

Степень изученности проблемы. Особенности формирования и проблемы развития жилищного фонда России были изучены в ряде исследований отечественных ученых в области градостроительства, архитектуры, социологии и других научных дисциплин. Большое количество исследований было направлено на разработку типологии жилья массовых серий, которое возможно было возводить на всей территории страны. Развитие типов массового жилища и формирование планировочной структуры жилой ячейки было освещено в работах отечественных ученых: З.К. Петровой, В.К. Лицкевича, М.В. Лисициана, Е.С. Пронина, Б.Ю. Бранденбурга, Л.Н. Киселевича, Т.И. Моргуновой и др. Проблемам комплексного развития жилой застройки посвящены исследования Г.В. Дворецкой, В.В. Кутозова, Н.М. Токарской и др.

Региональные аспекты планировочного формирования территорий жилой застройки городов Белгородской области были затронуты в исследованиях М.В. Перьковой, А.Г. Большакова, В.В. Перцева, Т.А. Поляковой, В.Ю. Поповой [7–13]. Однако, региональные особенности и современное состояние территорий жилой застройки массовых серий в городах Центрально-

Черноземного района, в частности г. Белгорода требуют более детального рассмотрения.

Хотя архитекторы и градостроители понимают несовершенство и противоречивость сложившейся системы массовой жилой застройки и настойчиво ищут пути формирования новой эстетики и комфортности жилой среды, данная тема требует более подробного изучения, именно в связи с региональными особенностями территорий массовой жилой застройки.

В этой связи, наиболее актуальным представляется изучение современного состояния территорий массовой жилой застройки в структуре региональных центров Российской Федерации, включая определение типологии застройки, особенностей ее планировочной структуры и этапов ее формирования. Целью исследования является изучение структуры жилой застройки первых массовых серий и выделение ее региональных особенностей на примере г. Белгорода. Го-

род Белгород является исторически сложившимся крупным городом и административным центром Белгородской области. Изучение градостроительной практики г. Белгорода дает возможность выявить закономерности планировочного развития, типичные для ряда крупных городов Центрально-Черноземного района [14].

По результатам предварительного анализа, проведенного в рамках данного исследования на сегодняшний день многоквартирный жилой фонд первых массовых серий застройки (старше 50-ти лет) составляет около 30% жилья Белгородской области – это около 6,5 млн. м² жилья (более 96 тыс. квартир), из них до 38% (около 2,5 млн. м²) составляют панельные жилые дома нормативный срок эксплуатации которых истекает (рис. 1). Около 2,7 млн. м² (более 42 тыс. квартир) располагаются в областном центре – г. Белгороде (рис. 2, табл. 1).

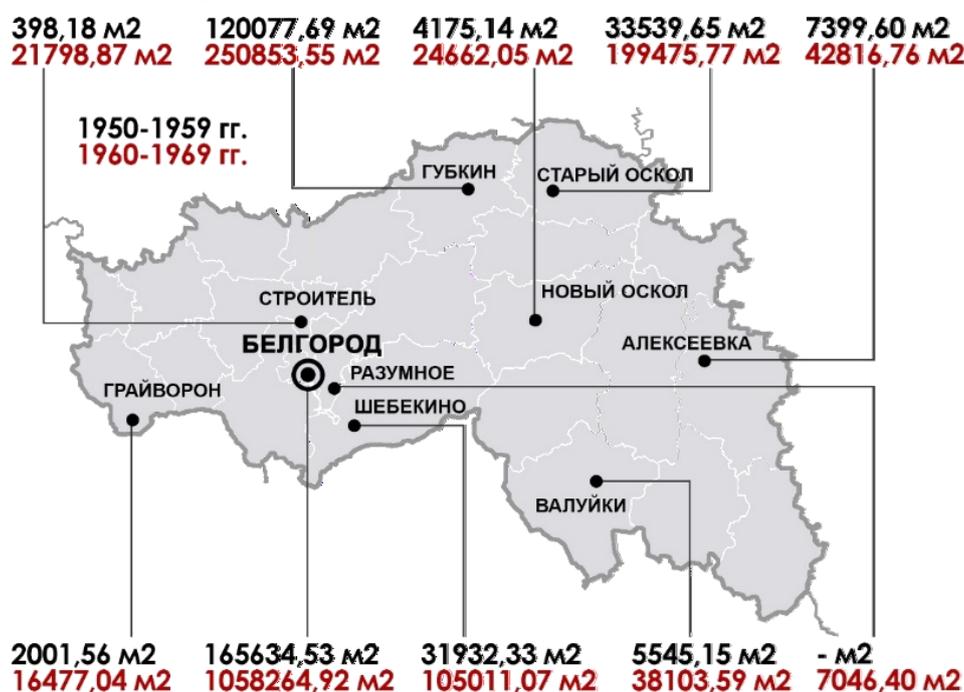


Рис. 1. Жилые дома массовых серий (1950 – 1969 гг.) в структуре жилого фонда Белгородской области

В ходе настоящего исследования была проанализирована застройка домами первых массовых серий за период с 1950 г. по 1979 г. в г. Белгород с использованием открытых баз данных. В структуре жилого фонда выделены и дифференцированы по этажности и году ввода в эксплуатацию панельные жилые дома. Выявлено, что жилой фонд панельной застройки первых массовых серий в г. Белгород составляет 24,33 % в структуре жилого фонда города. Данные территории потенциально нуждаются в реновации, в связи с чем, необходимо изучение формирования их планировочной структуры в исторической ретроспективе, анализ типологии жилых зданий,

определение их современного состояния и перспективных сценариев комплексного развития территории. Анализ основных типов территорий массовой жилой застройки позволит выявить региональные особенности формирования структуры жилищного фонда городов Центрального Черноземья на примере г. Белгорода, а также оценить современное состояние жилой среды и условия жизни местного населения.

Материалы и методы исследования. В исследовании были применены комплексный и структурный подходы, использованы методы ретроспективного анализа, типологического анализа и классификации объектов жилой среды.

Изучены этапы развития жилищного фонда г. Белгорода, произведена оценка фактических данных о структуре жилой застройки массовых серий города, изучение и анализ нормативных документов по проектированию жилой среды. Выполнен анализ реестра жилых объектов массовых

серий застройки, подлежащих реновации в структуре г. Белгорода. Проведено обследование территорий жилого фонда массовых серий г. Белгорода, анализ их современного состояния и фотофиксация.

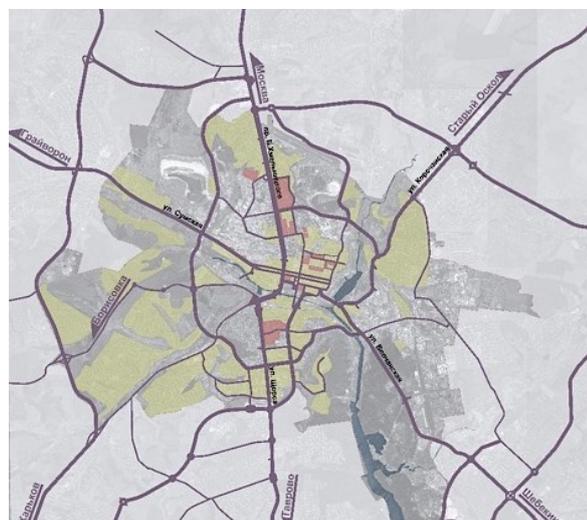


Рис. 2. Территории жилой застройки массовых серий (1950 – 1979 гг.) в структуре г. Белгорода

Объемы строительства многоквартирных жилых домов первых массовых серий в городе Белгороде

Год постройки	Площадь (м2)	Кол-во квартир
• 1950 – 1959	• 165 634	• 1 699
• 1960 – 1969	• 1 058 264	• 16 736
• 1970 – 1979	• 1 554 634	• 23 908
ИТОГО:	2 778 532	42 343

- Основные автомагистрали
- Территории жилой застройки в период с 1959-1975 года
- Территория жилой застройки

Таблица 1

Застройка домами первых массовых серий в период с 1950 г. по 1979 г. в г. Белгород

Год постройки	Кол-во домов всего, шт.	Кол-во кирпичных домов, шт.	Кол-во панельных домов, шт.	Нет информации	Прочие (деревянные, блочные и др.)
До 1950 г.	Всего – 37 Кирпичных – 29 Панельных – 0	1 этаж – 7 2 этажа – 19 3 этажа – 3	-	-	8
1950–1959 гг.	Всего – 151 Кирпичных – 97 Панельных – 0	1 этаж – 6 2 этажа – 57 3 этажа – 17 4 этажа – 13 5 этажей – 4	-	21	33
1960–1969 гг.	Всего – 334 Кирпичных – 262 Панельных – 50	1 этаж – 2 2 этажа – 26 3 этажа – 41 4 этажа – 55 5 этажей – 136 9 этажей – 2	5 этажей – 50	10	12
1970–1979 гг.	Всего – 333 Кирпичных – 163 Панельных – 158	1 этаж – 2 2 этажа – 20 3 этажа – 2 4 этажа – 2 5 этажей – 107 6 этажей – 1 9 этажей – 25 12 этажей – 4	5 этажей – 123 6 этажей – 8 9 этажей – 26 10 этажей – 1	7	5
Всего	855 (100 %)	551 (64,44 %)	208 (24,33 %)	38 (4,44 %)	58 (6,78 %)

Основная часть. Жилые объекты, возведенные на территории Российской Федерации, составляют ее жилищный фонд. В зависимости от формы собственности и целей использования,

жилищный фонд подразделяется на несколько категорий. По форме собственности жилищный фонд разделяется на три группы: частный; госу-

дарственный; муниципальный. По целям использования жилищный фонд делится на четыре основные группы: социального использования; специализированный; индивидуальный; коммерческий. Разграничение жилищного фонда в РФ связано с необходимостью его учета и, в зависимости от формы собственности, применения к нему правового режима, определяющего законодательное решение возникающих вопросов и применение тех или иных юридических норм. Поэтому необходимо, чтобы категория жилого фонда и цели использования, соответствовали действительности [2, 15].

Стоит также упомянуть еще о двух группах жилого фонда – это аварийный фонд и фонд реформирования ЖКХ. В настоящее время на территории России реализуется Федеральный проект «Обеспечение устойчивого сокращения непригодного для проживания жилищного фонда» национального проекта «Жилье и городская среда» в рамках исполнения Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204. Согласно данным Государственной корпорации фонда содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства, размещенной в открытом доступе на настоящий момент времени количество аварийных жилых домов в Белгородской области составляет 269 (122,87 тыс. м²). В структуре аварийного жилищного фонда по годам постройки 82,6 % составляет жилая застройка 1946 -1970 гг., 8,1 % – жилая застройка 1971–1995 гг. Кроме того панельные жилые дома первых массовых серий застройки, нормативный срок эксплуатации которых истекает, потенциально могут сформировать тенденции неконтролируемого перехода в аварийное состояние жилых объектов. Предельный допустимый износ зданий составляет 70%. При превышении показателя жилье признается ветхим и подлежит сносу. В этой связи необходим тщательный анализ современного состояния жилой застройки первых массовых серий г. Белгорода, создание подробной базы данных по конструктивному состоянию многоквартирных домов, а также анализ планировочной структуры территорий перспективных к реновации.

Развитие жилой застройки массовых серий в структуре города Белгорода возможно подразделить на несколько основных этапов: с 1945 по 1964 гг. – период восстановления города после военных действий и начало развития массового жилищного строительства; с 1964 по 1980е гг. – активное строительство массового жилищного фонда; 1980е гг.- н.в. – современный период.

Послевоенный период развития жилой застройки. В период ВОВ город Белгород претер-

пел значительные разрушения. После его освобождения в 1943 году началось массовое восстановление инфраструктуры города. К 1945-му – введена в строй Белгородская ЦЭС, возобновлены работы по строительству котельного завода (впоследствии «Энергомаш»), построен маслозавод. В 1949 году запущен цементный завод, в этом же году сдан в эксплуатацию новый железнодорожный вокзал станции Белгород. В период с 1946 по 1950 гг. на территории Белгородской области было введено 900 тыс. м² общей площади жилья (табл. 2); построены 70 общеобразовательных школ (на 16,6 тысяч учебных мест) и дошкольных учреждений (на 200 тысяч мест), больницы, а также первая дорога с твердым покрытием «Москва – Харьков – Симферополь» [16].

В послевоенный период, происходило стремительное развитие жилищного фонда: перестраивались старые и разрушенные дома, появлялись новые улицы, в основном, осуществлялось строительство многоквартирных двухэтажных жилых домов, отличающихся повышением уровня комфорта квартиры. В 1953 г. произошел переход от концепции двухэтажного города в пользу трехэтажного (табл.2). Трехэтажные дома в г. Белгороде возводились до 1956 г. (здания на бывшем пр. Ленина, пр. Б. Хмельницкого и ул. Мичурина) [6, 17] (рис.3).

Период развития индустриального домостроения. В 1950-1970 годы в г. Белгороде осуществляется строительство первых экспериментальных индустриальных типов многоквартирных домов [7, 15]. С 1957 года и в течение последующих 15 лет Белгород расширяется за счет присоединения пригородов и рабочих посёлков. Территориально в состав Белгорода входили две слободы (Савино и Жилая), а также несколько пригородных сёл (Супруновка, Пушкарное, Красное, Кошары, Стрелецкое, Гринёвка, Оскочное, Ячнево, Старый город, Дальние Пески, Покровка, Михайловка) с застройкой сельского типа [18].

В этот период в первую очередь развивалась центральная часть г. Белгорода (район Садовой-Павлова), используя под строительство жилья свободные участки земли. Территория Жилой слободы расширялась в западном направлении, объединившись в итоге с Болховцом. В северо-западной промышленной части города был заложен рабочий посёлок и назван «Октябрьский» (впоследствии переименованный в микрорайон «Сокол»), на территории которого были возведены средняя школа и клуб (в последствии клуб стал кинотеатром «Сокол», а позднее – «Домом офицеров»). Практически одновременно на юж-

ной окраине города осуществлялось строительство посёлка – Первомайский. А рядом со Старым городом, вдоль «старой дороги» (в настоящее время – ул. К. Заслонова) был построен ещё один крупный посёлок – Железнодорожный. Но-

вые рабочие посёлки в основном состояли из типового жилья. В это же время на станции Крейда, осуществляется строительство хутора на прилегающей к элеватору территории. В настоящее время район Крейды является крупным жилым массивом (рис. 2) [8].

Таблица 2

Статистика по годам постройки, площади и количеству зарегистрированных жителей в жилом фонде в период с 1946 по 1964 гг.

<i>№</i>	<i>Год</i>	<i>Кол-во домов</i>	<i>Площадь м²</i>	<i>Кол-во зарегистрированных жителей</i>
1	1946	1	181.20	17
2	1947	1	492.20	17
3	1948	6	2576.91	151
4	1949	5	2082.67	111
5	1950	6	3345.20	172
6	1951	4	2183.25	97
7	1952	4	3870.60	142
8	1953	8	6350.93	255
9	1954	8	4949.05	249
10	1955	10	9941.15	386
11	1956	13	10982.18	470
12	1957	11	14379.68	497
13	1958	20	34330.28	961
14	1959	19	23820.69	955
15	1960	27	52926.85	1965
16	1961	28	58817.41	2370
17	1962	44	84150.03	3655
18	1963	30	74254.24	3126
19	1964	24	71030.12	2842

С 1957 года начинается серийное строительство многоэтажного малогабаритного жилья – кирпичных и панельных жилых домов средней этажности - «Хрущёвок» (95 % всей застройки), 5-ти этажная застройка остается преобладающей (80%). С 1964 по 1982 гг. г. Белгород продолжает активно застраиваться (табл. 3, рис.3) [7]. на Харьковской горе (по ул. Королева, Костюкова, и Губкина) и в районе Меловой горы. В этот же период осуществляется строительство и благоустройство микрорайона «Черемушки» с кинотеатром «Радуга» и с парком им. Ленина (табл. 3, рис. 4.).

До середины 70-х годов ежегодный ввод жилья составлял практически 100 тыс. м². На сегодняшний день квартиры и дома 1960-х годов уже не отвечают современным технико-эксплуатационным и моральным требованиям. Их основным недостатком являются: малые площади кухонь (с площадью от 4,0 до 6,0 м²), прихожих (площадью 5,0 м²) и совмещенных санитарных узлов, а также высота помещений (до 2,5 м.) [6,12]. Более подробный анализ приведен в таблице 4 и рисунке 5.



Рис. 3. Жилая застройка массовых серий в планировочной структуре г. Белгород. Послевоенный период – 1945–1964 гг.

Таблица 3

Статистика по годам постройки, площади и количеству зарегистрированных жителей в жилом фонде в период с 1965 по 1982 гг.

№	Год	Кол-во домов	Площадь м ²	Кол-во зарегистрированных жителей
1	1965	25	67780.64	2855
2	1966	32	98924.74	4068
3	1967	28	87951.82	3465
4	1968	25	97784.81	3895
5	1969	31	103068.06	4183
6	1970	30	103338.69	4274
7	1971	20	85144.02	3533
8	1972	27	109707.80	4763
9	1973	45	155592.07	6369
10	1974	37	153643.80	6814
11	1975	34	128338.50	5996
12	1976	33	156839.03	6130
13	1977	33	153718.63	6798
14	1978	24	118183.85	5298
15	1979	18	98436.85	4510
16	1980	21	130570.83	6045
17	1981	10	61574.60	2884
18	1982	22	197952.25	7487

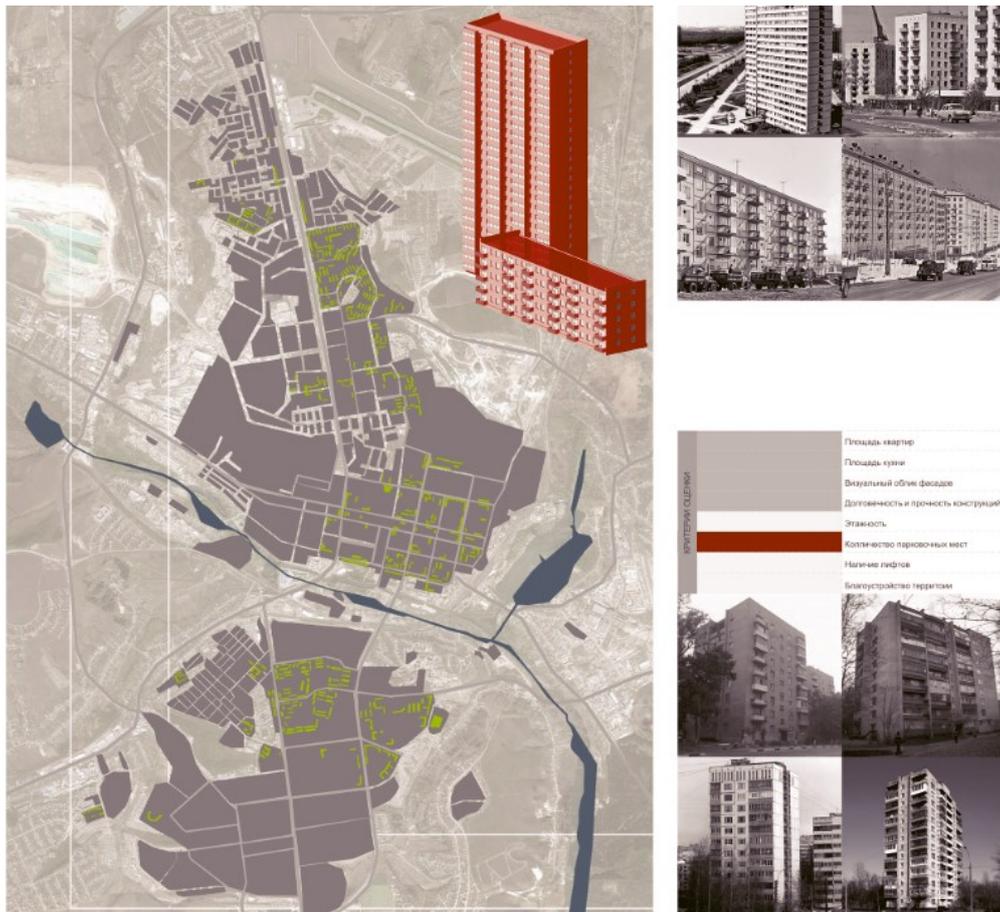


Рис. 4. Жилая застройка массовых серий в планировочной структуре г. Белгород. Период 1964-1980-е гг.

Таблица 4

Анализ серийной панельной застройки Белгородской области

<i>Номер серии</i>	<i>Тип конструкции</i>	<i>Преимущества</i>	<i>Недостатки</i>
И-32-130	Панельный	Для отдельных категорий граждан это был единственный вариант получения отдельной квартиры.	Низкие потолки, малая площадь кухни
1-464а	Панельный	Встроенные шкафы, отдельные сан.узлы	Малая площадь кухни
И-20	Кирпичный	Хорошая теплоизоляция, обусловленная кирпичными стенами	Отсутствие грузового лифта
М-335	Панельный	Наличие балконов, возможности для перепланировок.	Совмещенные сан.узлы, низкая теплоизоляция стен, низкая шумоизоляция между комнатами, небольшие площадки комнат и кухонь.
1-447	Кирпичный	Имеется возможность сноса межкомнатных перегородок	Маленькая площадь кухонь в 2-3-ком. квартирах
111-88	Панельный	Просторные планировки, отдельный сан. узел, имеются лоджии	Недостаточная теплопроводность, плохая шумоизоляция, низкие потолки
И-513	Кирпичный	Экономичность жилья, возможность перепланировки, замена коммуникаций на новые в ходе капитального ремонта	Отсутствие ванной комнаты, низкие потолки
1-480	Панель Кирпичный	По сравнению с 438 серией, серия 480 более дешевая по производству, не имеет ограничений по перепланировке	Ухудшенные планировки, небольшие площади кухни, моральное и физическое старение зданий серии, проблемы со стыками между панелями в торцах зданий

Кпд 4570	Панельный	Раздельные сан.узлы	Относительно низкие потолки, балконы не во всех квартирах, небольшие кухни
87	Кирпичный	Более эффектный внешний вид и улучшенные планировки, дополнительные удобства по сравнению с «хрущевками», в домах имеется лифт и мусоропровод.	Модификации с типичными планировками уступают по характеристикам домам улучшенной категории
111-83	Панельный	В квартирах увеличена площадь кухни (8 кв. м.), имеются кладовые и лоджии, раздельный сан.узел, в современных модификациях серии площадь квартир увеличена в среднем на 10 кв. м.	В домах более ранних модификаций недостаточная теплоизоляция как в большинстве панельных домов
ii-18-01/086, ii-18-01/096	Блочный	Наличие лифта и мусоропровода, возможность изолировать комнаты в 2-ком. квартирах, кроме центральной, за счет организации входа в дальнюю комнату из кухни	Отсутствие грузопассажирского лифта, смежные комнаты, небольшие кухни, сидячие ванны, у серии ii-18-01 — неравномерная осадка различных частей дома, поскольку фундаменты главных фасадов и остальных стен раздельные, промерзание торцевых углов
К-7	Панельный	Во всех квартирах раздельные санузлы, просторные кухни	Отсутствие балконов и мусоропровода, низкий уровень тепло и звукоизоляции, низкое качество фундамента
ii-32	Панельный	Наличие балконов, увеличенные площади кухонь	Деформация конструкций внешних стен
ii-35	Панельный	Возможность перепланировки квартир	Низкое качество межпанельных швов, плохая тепло- и звукоизоляция, склонность здания к деформации, низкое качество утеплителей
Мг-300	Панельный	Наличие балконов и раздельные санузлы в 3-ком. квартирах	Невысокая прочность внешних стен, отсутствие возможности существенной перепланировки

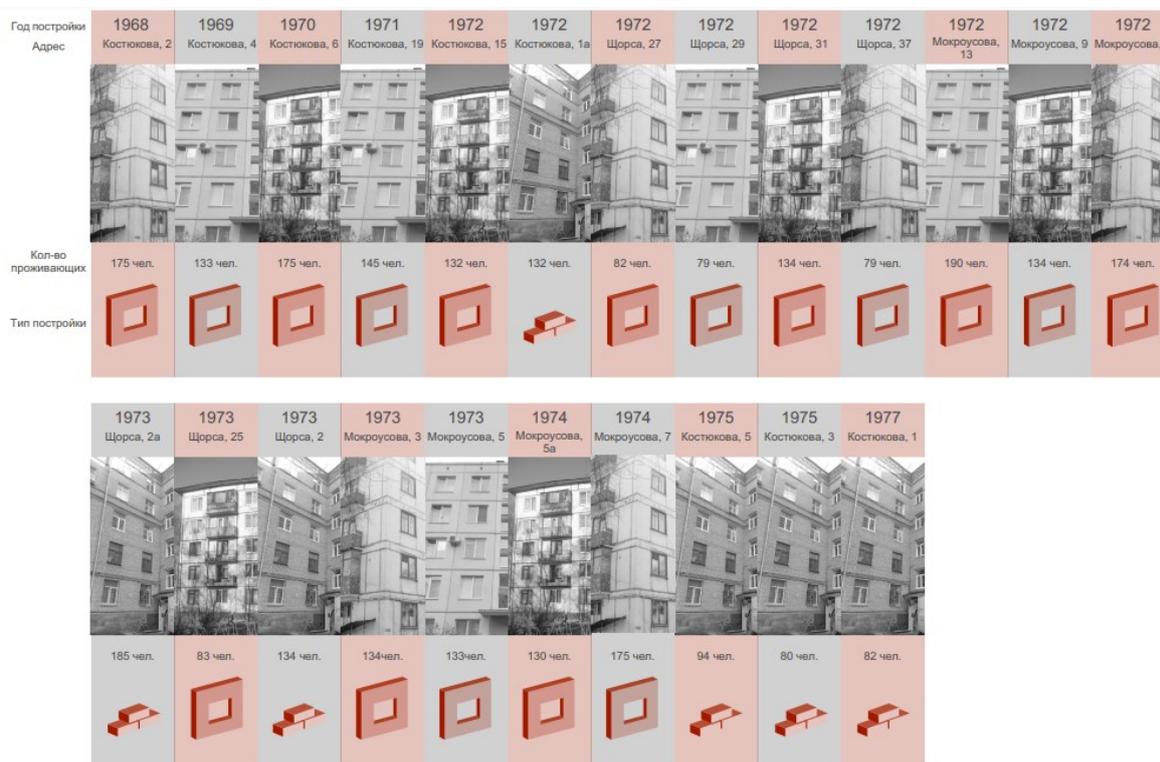


Рис. 5. Жилой фонд улиц Железняка, пр. Б. Хмельницкого, ул. Садовая, ул. Студенческая в г. Белгород. Сост. А.Ю. Пампуценко

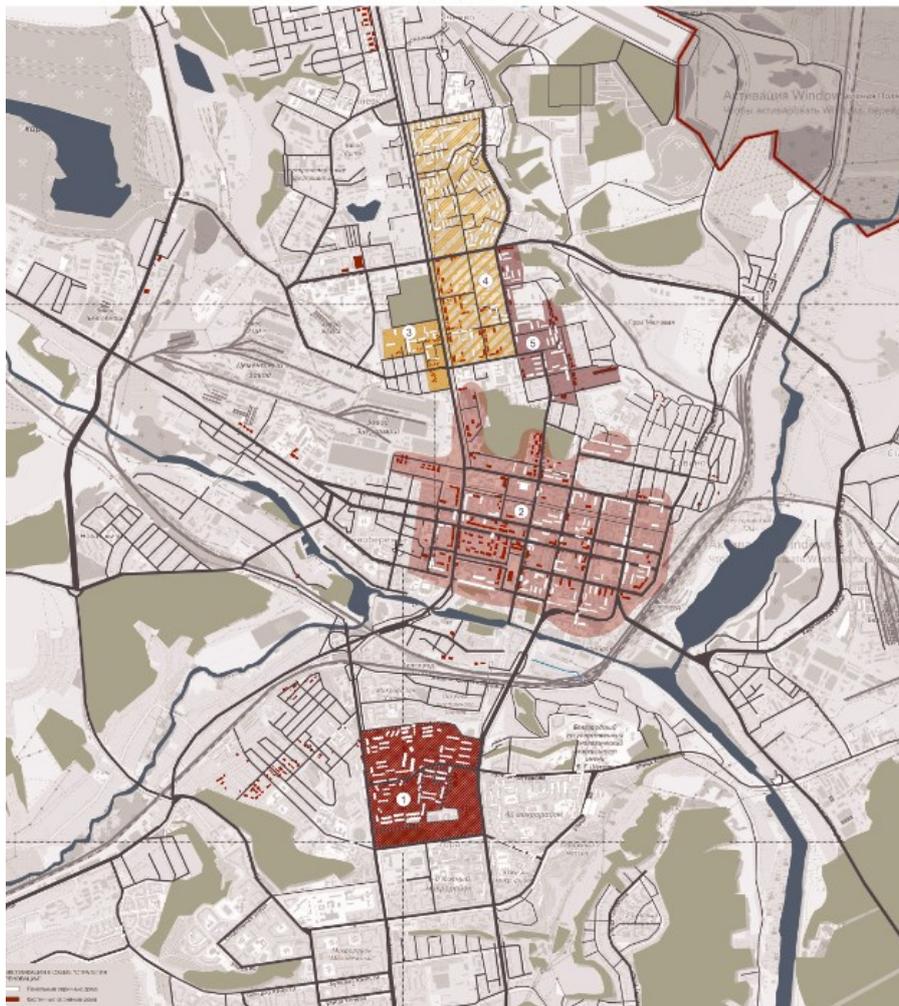


Рис. 6. Территории жилой застройки массовых серий, перспективные к реновации в г. Белгороде.
Сост. А.Ю. Пампушенко

Современное состояние жилой застройки массовых серий в структуре жилой застройки г. Белгорода. Всего за рассмотренный период в г. Белгороде введено в эксплуатацию 855 домов, из них:

- кирпичных – 551 дом – 64,44 %;
- панельных – 208 домов – 24,33 %;
- прочие дома – 58 домов – 6,78 %.

Из них 50 панельных жилых домов относятся к 1960–1969 гг. постройки, нормативный срок эксплуатации которых истекает. Среди них: мкр. «Черемушки» в границах улиц Железняка, пр. Б. Хмельницкого, ул. Садовая, ул. Студенческая, мкр. в границах улиц Щорса, 5 августа, Костюкова, Ватутина, мкр. «Гриневка» и др. (рис. 6.). Данные жилые дома расположены в границах города Белгорода на территориях, обеспеченных инженерной, транспортной и социальной инфраструктурой и могут рассматриваться как перспективные к реновации территории [19–21].

В ходе исследований выделены характерные территории жилой застройки, перспективные к

реновации в г. Белгороде, включая основные характерные типы жилой застройки массовых серий:

- 1) смешенная жилая застройка 5-ти этажными панельными и кирпичными домами;
- 2) жилая застройка смешанного типа многоквартирными домами с включением ИЖС.

Выводы. В результате анализа структуры жилой застройки первых массовых серий и соотношения объемов жилого фонда по основным типам жилых домов и квартир, а также этапам жилищного строительства в г. Белгороде было установлено следующее:

- до 1953 г. в Белгород строились жилые здания преимущественно до двух этажей,
- в 1953–1956 гг. концепция развития жилищного фонда сменилась в пользу трехэтажного строительства;
- с 1957 г. тиражируются первые проекты пятиэтажных домов типовых массовых серий в структуре г. Белгород;
- активное развитие жилых зон города началось с 1958 г. и продолжается до настоящего времени;

На текущем этапе проводимого исследования комплексно проанализирована территория города с выявлением типов жилых домов массовых серий (по различным признакам: этажность, год постройки, материал несущих конструкций и пр.). В ходе исследования выделены основные, характерные для г. Белгорода типы территорий жилой застройки первых массовых серий: 1) территории смешанной застройки 5-ти этажными кирпичными и панельными зданиями; 2) жилая застройка многоквартирными домами с включением ИЖС. Выявлены территории, наиболее нуждающиеся в реновации и обновления жилого фонда, среди них: мкр. «Черемушки», в границах улиц Железняка, пр. Б. Хмельницкого, ул. Садовая, ул. Студенческая, мкр. «Гриневка», мкр. в границах улиц Щорса, 5 августа, Костюкова, Ватутина. В этой связи необходима разработка региональных сценариев реновации жилой среды для различных типов территорий, включающих комплексное развитие территорий. Разработка и применение региональных сценариев реновации жилой среды будет способствовать:

- исключению неконтролируемого вывода жилых объектов из эксплуатации;
- повышению эффективности использования городских территорий, обеспеченных инженерной и транспортной инфраструктурой;
- развитию социальной и сервисной инфраструктуры;
- улучшению качества жизни населения.

Исходя из зарубежного и отечественного опыта реновации жилых территорий возможно выделить два основных направления: экстенсивное и интенсивное. Экстенсивное развитие включает в себя сценарии сжатия и стабилизации застройки, интенсивный сценарий подразумевает рост и уплотнение застройки. Для улучшения экономических показателей проектов реновации и привлечения инвесторов целесообразно избирать сценарии роста, включающие уплотнение застройки, повышение этажности и развитие социальной инфраструктуры.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булгаков С.Н., Рыбалко И.В. Окупаемая реконструкция пятиэтажной жилой застройки // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 2. С. 45–46.
2. Yankovskaya Y.S., Vaytens A.G. Renovation of mass residential development in late 1950s-early 1970s in St. Petersburg: Problems and perspectives // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P055028. DOI 10.1088/1757-899X/687/5/055028.
3. Пампущенко А.Ю., Ладик Е.И., Перцев В.В. Реновация массовой застройки на примерах зарубежного и отечественного опыта // Современные проблемы архитектуры и градостроительства: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. С. 205–214.
4. Коренькова Г.В., Митякина Н.А., Белых Т.В., Дорохова Е.И. Зарождение реновационных процессов в жилищной сфере крупных городов России (на примере города Белгорода) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 60–69. DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69.
5. Крупенков А.Н. Пройдемся по старому городу. 6-е изд. Белгород: Константа, 2012. 740 с.
6. Сайт органов местного самоуправления. О Белгороде [Электронный ресурс]. URL: <http://www.beladm.ru/o-belgorode/> (дата обращения: 28.03.2022)
7. Попова В.Ю. Типология жилищного фонда города Белгорода // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. №12. С. 73–82. DOI: 10.12737/article_5c1c9962ba70d6.35793184
8. Перькова М.В. Градостроительное развитие Белгородской региональной системы расселения и ее элементов // Архитектура и строительство России. 2016. Вып.4. С. 12–17.
9. Perkova M.V. Regional settlement system // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No/ 4. Pp. 26621–26634.
10. Perkova M.V., Baklazhenko E.V., Vaytens A.G. Urban Conflicts of the Belgorod Regional Settlement System and its Elements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2018. 032014. DOI 10.1088/1757-899X/463/3/032014.
11. Shcherbakova T.P., Lavrik G.I., Perkova M.V. System requirements reconstruction the living environment of big city // Middle East Journal of Scientific Research. 2013. Vol. 18. No 10. Pp. 1486–1491. DOI 10.5829/idosi.mejsr.2013.18.10.70110.
12. Полякова Т.А. Роль планировочной структуры в формировании неблагоприятной экологической ситуации в крупных городах на примере г. Белгорода // Актуальные проблемы современной науки: тр. 2-го Междунар. форума. Самара: СМГТУ, 2006. Ч. 16. С. 67–69.

13. Большаков А.Г., Лоншаков Д.А., Бондарева В.Ю., Щербакова Т.П. Оценка взаимосвязи социальных и пространственных факторов в планировке города Белгорода // Вестник ИрГТУ. 2015. №1(96). С. 88–102.

14. Горожанкина Г.В. Развитие системы градостроительной документации городов (на примере Белгородской области): дис. ... канд. архитектуры: 18.00.04. Воронеж, 2006. 134 с.

15. Форум «Российский дом будущего. Долгосрочная стратегия массового строительства жилья в России» [Электронный ресурс]. URL: https://raex-a.ru/researches/city/town-planning_principles (дата обращения: 28.03.2022)

16. Планировка центра Белгорода 1945-1951 годов [Электронный ресурс]. URL: https://raex-a.ru/researches/city/town-planning_principles (дата обращения: 28.03.2022)

17. Большая стройка [Электронный ресурс]. URL: <https://www.belpressa.ru/24033.html> (дата обращения: 28.03.2022)

18. Narozhnyaya A.G., Chugunova N.V., Polyakova T.A., Kukharuk N.S., Morkovskaya D.N.

Urban sprawl in the regional settlement system: A case study of Belgorod and Stary Oskol-Gubkin metropolitan areas // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Orenburg, 2021. 012073. DOI 10.1088/1755-1315/817/1/012073.

19. Киселев С.Н., Перцев В.В., Перькова М.В. Особенности формирования комплексной инфраструктуры как фактор повышения качества жизни населения на территории Белгородской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 11–15.

20. Drebezgova M.Y., Perkova M.V., Ladik E.I., Percev V.V., Chernyshev Y.V. Adaptation of Industrial Territories // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 227. Pp. 175–184. DOI 10.1007/978-3-030-94770-5_13.

21. Лоншаков Д.А. Социальная эффективность градостроительства. Типовая жилищная застройка как показатель градостроительной ценности района (на примере г. Белгорода) // Тенденции развития науки и образования. 2016. № 21-1. С. 39–47. DOI 10.18411/lj-25-12-2016-1-14

Информация об авторах

Перцев Виталий Владимирович, директор Архитектурного Института Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. E-mail: percev_av@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Пампущенко Андрей Юрьевич, магистрант Белгородского Государственного Технологического Университета им. В.Г. Шухова. E-mail: arampushenko@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ладик Елена Игоревна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры и градостроительства, доцент высшей школы дизайна и архитектуры E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Поступила 06.10.2022 г.

© Перцев В.В., Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю., Пампущенко А.Ю., 2022

¹Percev V.V., ^{1,2}*Ladik E.I., ¹Drebezgova M.Y., ¹Pampushenko A.Y.

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

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

*E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru

FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE HOUSING FUND OF THE FIRST MASS DEVELOPMENT SERIES IN THE CITY OF BELGOROD

Abstract. The article considers the typology of the housing stock of mass building series on the example of the city of Belgorod. Data on its classifications are presented: according to the form of ownership, purpose of use, planning structure, design features. Analyzed historical archival data relating to the development of the housing stock in Belgorod. The main stages in the development of residential territories of mass series in the city of Belgorod are singled out: from 1945 to 1964 – the period of restoration of the city after hostilities and the beginning of the development of mass housing construction; from 1964 to 1980s – the period of active

construction of mass housing stock; 1980s – present – modern period. Each time period was studied according to a number of factors: population, building area, number of storeys, construction materials, planning solutions for residential buildings of mass series, etc. The sequence of formation and development of residential buildings of mass series in the structure of the city of Belgorod and nearby settlements is considered. The current state of the housing stock of the first mass series in the building structure of Belgorod is analyzed. The characteristic types of residential development areas and promising areas for the renovation of residential development of the first mass series are identified.

Keywords: housing stock, residential development, mass series of residential development, typology of residential development, residential development areas

REFERENCES

1. Bulgakov S.N., Rybalko I.V. Cost-effective reconstruction of a five-storey residential building [Okupaemaya rekonstrukciya pyatietazhnoj zhiloz zastrojki] Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. 2006. No 2. Pp. 45–46. (rus)
2. Yankovskaya Y.S., Vaytens A.G. Renovation of mass residential development in late 1950s-early 1970s in St. Petersburg: Problems and perspectives. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. 055028. DOI 10.1088/1757-899X/687/5/055028.
3. Pampushchenko A.Y., Ladik E.I., Percev V.V. Renovation of mass building on the examples of foreign and domestic experience [Renovaciya massovoj zastrojki na primerah zarubezhnogo i otechestvennogo opyta] Sovremennye problemy arhitektury i gradostroitelstva: Sbornik dokladov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shukhova, 2022. Pp. 205–214. (rus)
4. Korenkova G.V., Mityakina N.A., Belyh T.V., Dorohova E.I. The origin of renovation processes in the housing sector of large cities of Russia (on the example of the city of Belgorod) [Zarozhdenie renovacionnyh processov v zhilishchnoj sfere krupnyh gorodov Rossii (na primere goroda Belgoroda)] Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No 1. Pp. 60–69. DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69. (rus)
5. Krupenkov A.N. Let's walk through the old town [Projdemsya po staromu gorodu] 6-e izd. Belgorod: Konstanta, 2012. 740 p. (rus)
6. Site of local governments. About Belgorod [Sajt organov mestnogo samoupravleniya. O Belgorode] URL: <http://www.beladm.ru/o-belgorode/> (date of treatment: 28.03.2022) (rus)
7. Popova V.Y. Typology of housing stock in the city of Belgorod [Tipologiya zhilishchnogo fonda goroda Belgoroda] Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No 12. Pp. 73–82. DOI: 10.12737/article_5c1c9962ba70d6.35793184 (rus)
8. Perkova M.V. Urban development of the Belgorod regional settlement system and its elements [Gradostroitelnoe razvitie Belgorodskoj regionalnoj sistemy rasseleniya i ee elementov] Arhitektura i stroitelstvo Rossii. 2016. Vol. 4. Pp. 12–17. (rus)
9. Perkova M.V. Regional settlement system. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No 4. Pp. 26621–26634.
10. Perkova M.V., Baklazhenko E.V., Vaytens A.G. Urban Conflicts of the Belgorod Regional Settlement System and its Elements. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2018. 032014. DOI 10.1088/1757-899X/463/3/032014.
11. Shcherbakova T.P., Lavrik G.I., Perkova M.V. System requirements reconstruction the living environment of big city. Middle East Journal of Scientific Research. 2013. Vol. 18. No 10. Pp. 1486–1491. DOI 10.5829/idosi.mejsr.2013.18.10.70110.
12. Polyakova T.A. The role of the planning structure in the formation of an unfavorable environmental situation in large cities on the example of the city of Belgorod [Rol planirovochnoj struktury v formirovanii neblagopriyatnoj ekologicheskoj situacii v krupnyh gorodah na primere g. Belgoroda] Aktualnye problemy sovremennoj nauki: tr. 2-go Mezhdunar. foruma. Samara: SMGTU, 2006. Vol. 16. Pp. 67–69. (rus)
13. Bolshakov A.G., Lonshakov D.A., Bondareva V.Y., Shcherbakova T.P. Assessment of the relationship of social and spatial factors in the planning of the city of Belgorod [Ocenka vzaimosvyazi socialnyh i prostranstvennyh faktorov v planirovke goroda Belgoroda] Vestnik IrGTU. 2015. No1(96). Pp. 88–102. (rus)
14. Gorozhankina G.V. Development of the system of urban planning documentation of cities (on the example of the Belgorod region) [Razvitie sistemy gradostroitelnoj dokumentacii gorodov (na primere Belgorodskoj oblasti): dis. ... kand. arhitektury: 18.00.04. Voronezh, 2006. 134 p. (rus)
15. Forum «Russian House of the Future. Long-term strategy of mass housing construction in Russia» [Forum «Rossijskij dom budushchego. Dlgosrochnaya strategiya massovogo stroitelstva zhilya v Rossii»]. URL: https://raex-a.ru/researches/city/town-planning_principles (date of treatment: 28.03.2022) (rus)
16. Layout of the center of Belgorod 1945-1951 [Planirovka centra Belgoroda 1945-1951 godov]. URL: https://raex-a.ru/researches/city/town-planning_principles (date of treatment: 28.03.2022) (rus)

17. Big construction [Bolshaya strojka]. URL: <https://www.belpressa.ru/24033.html> (date of treatment: 28.03.2022) (rus)

18. Narozhnyaya A.G., Chugunova N.V., Polyakova T.A., Kukharuk N.S., Morkovskaya D.N. Urban sprawl in the regional settlement system: A case study of Belgorod and Stary Oskol-Gubkin metropolitan areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Orenburg, 2021. 012073. DOI 10.1088/1755-1315/817/1/012073.

19. Kiselev S.N., Percev V.V., Perkova M.V. Features of the formation of an integrated infrastructure as a factor in improving the quality of life of the population on the territory of the Belgorod region [Osobennosti formirovaniya kompleksnoj infrastruktury kak faktor povysheniya kachestva zhizni naseleniya na territorii Belgorodskoj oblasti] Vestnik

BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. No 1. Pp. 11–15. (rus)

20. Drebezgova M.Y., Perkova M.V., Ladik E.I., Percev V.V., Chernyshev Y.V. Adaptation of Industrial Territories. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 227. Pp. 175–184. DOI 10.1007/978-3-030-94770-5_13.

21. Lonshakov D.A. Social efficiency of urban planning. Typical residential development as an indicator of the urban development value of the area (on the example of the city of Belgorod) [Socialnaya effektivnost gradostroitelstva. Tipovaya zhilaya zastroyka kak pokazatel gradostroitelnoy cennosti rajona (na primere g. Belgoroda)] Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2016. No. 21-1. Pp. 39–47. DOI 10.18411/lj-25-12-2016-1-14. (rus)

Information about the authors

Percev, Vitaly V. Director of the architectural institute. E-mail: percev_av@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ladik, Elena I. PhD. E-mail: krushelnitskaya.lena@yandex.ru Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Russia, St. Petersburg, 195251, Polytechnicheskaya St. 29, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Pampuschenko, Andrey Y. graduate student. E-mail: apampushenko@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 06.10.2022

Для цитирования:

Перцев В.В., Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю., Пампущенко А.Ю. Формирование структуры жилищного фонда первых массовых серий застройки города Белгорода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 62–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-62-74

For citation:

Percev V.V., Ladik E.I., Drebezgova M.Y., Pampuschenko A.Y. Formation of the structure of the housing fund of the first mass development series in the city of Belgorod. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 62–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-62-74

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-75-85

Супранович В.М., Сафронова А.Д.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: vmsupranovich@gmail.com*

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННОГО ОБЛИКА ЗДАНИЙ МУСОРОСОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ В КОНТЕКСТЕ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Аннотация. В статье рассматривается актуальная тема сортировки и переработки мусора в крупных городах, а именно организация специальных объектов сортировки и переработки мусора, объектов МСС (мусоросортировочных станций), в контексте городской структуры. В материалах статьи обоснована актуальность предложенной темы исследования. Целью статьи является определение основных принципов формообразования архитектурного образа вновь проектируемых объектов по сортировке мусора на территории Санкт-Петербурга. Выполнен сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта, на примере объектов, расположенных в границах городской застройки. На основе анализа зарубежного и отечественного опыта проектирования и реализации таких зданий выявлена проблематика взаимодействия сортировочных комплексов в городской среде с окружающей застройкой. Определены общие черты и различия, влияющие на размещение объектов по сортировке мусора в городской структуре в разных странах. Проведен краткий обзор исторических тенденций обращения с отходами в России. Выявлен основной формообразующий элемент – технологический модуль и его основные составляющие. По итогам проведенного исследования определены основные принципы формообразования архитектурно-художественного облика МСС (мусоросортировочных станций) в контексте городской среды. Предложены схемы компоновки модулей-объемов МСС с основными габаритными характеристиками участка и самих объемов.

Ключевые слова: здания МСС, архитектурно-художественный облик, формообразование, экология, Санкт-Петербург.

Введение. Проблема сортировки и переработки твердых бытовых отходов является актуальной для всего мира. В ряде стран этот вопрос успешно решается благодаря наличию системы обращения с мусором, которая включает в себя этапы первичной сортировки до непосредственной переработки на заводах [1]. В некоторых государствах лишь намечаются предпосылки по решению проблемы мусоропереработки [2]. Согласно докладу о климате 2021 года «Изменение климата 2021. Физическая научная основа» от 9 августа 2021, разработанная МГЭИК, необходимо в короткие сроки сократить рост свалок не переработанного мусора, для сохранения экологии планеты.

В России проблему утилизации отходов еще предстоит решить: с начала 2019 года стартовала реформа сбора бытового мусора. Она должна снизить нагрузку на окружающую среду и привести к появлению нового рынка работы с отходами. На сегодняшний день в ряде городов наблюдается внедрение раздельного сбора мусора. Однако, согласно исследованиям, процесс его интеграции ввиду социокультурных особенностей жизни населения страны займет длительный период, поэтому внедрение мусоросортировочных объектов является наиболее оптимальным решением для оперативной работы по обращению с отходами [3, 4].

В Санкт-Петербурге Комитетом по благоустройству были вынесены на рассмотрение ряд предложений, нацеленных на повышение качества городской среды в вопросе утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО). Правительство города заявило о необходимости организации объектов мусоросортировочных станций (МСС) и мусороперерабатывающих комплексов (МПК) в городской структуре. Таким образом, решение проблемы переработки отходов требует не только социально-экологического, но и архитектурного подхода [5, 6].

В конце декабря 2020 года Комитетом по градостроительству и архитектуре Санкт-Петербурга был опубликован проект территориальной схемы по обращению с твердыми коммунальными отходами (ТКО) для общественного обсуждения. В проекте было перечислено 7 земельных участков в городе, на которых возможно строительство предприятий по сортировке мусора (рис. 1).

Согласно приведенной схеме большинство предложенных территорий находятся на периферии города, что первоначально увеличивает транспортную нагрузку от перевозки мусора для сортировки и переработки отходов. Однако, с учетом роста городских границ, предлагаемые территории могут полноценно войти в состав городской ткани [7].

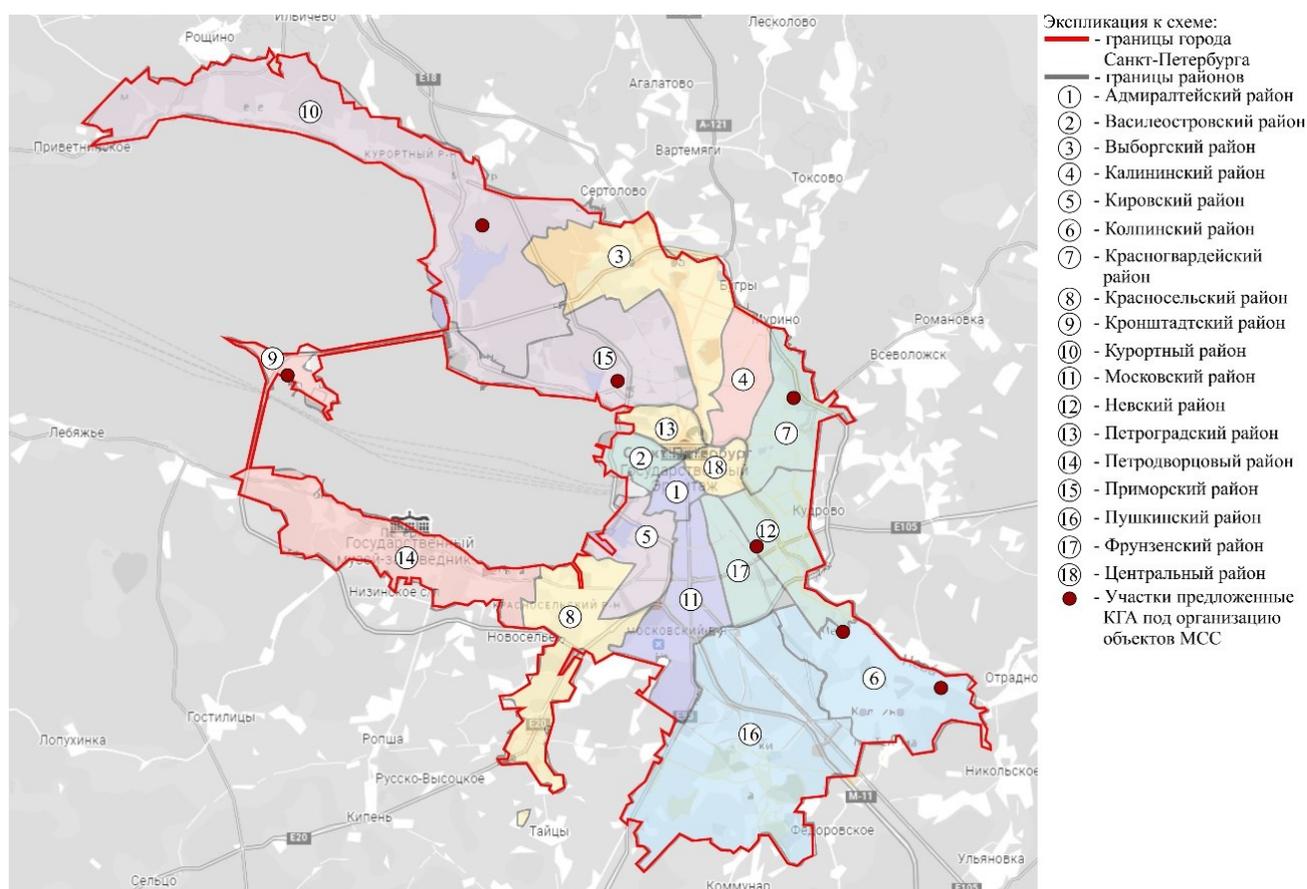


Рис. 1. Схема участков

В рамках Научно-исследовательской работы «Исследование архитектурно-художественного облика зданий мусоросортировочных комплексов в контексте городской среды» 2021 на базе кафедры Архитектурного проектирования СПбГАСУ предложено альтернативное размещение объектов МСС на территориях нефункционирующих старых промышленных сооружений. Как известно, исторически сложившаяся застройка Санкт-Петербурга имеет четкое функциональное зонирование. Город расширяется с учетом потребностей нынешнего поколения, и некогда исторические промышленные зоны («Серый пояс») требуют интеграции новой функции и перепрофилирования, так как не функционируют по своему первоначальному назначению или остановлены полностью [8, 9]. Проведение преобразования таких территорий в Санкт-Петербурге предполагает обращение к историческому формированию архитектурного образа застройки и большому ряду норм. Интеграция современных промышленных зон в городскую структуру может включать в себя и обязательное размещение МСС, как альтернативный вариант размещения данных объектов на окраине города. Это позволит решить проблему оптимизации транспортной нагрузки на дорожные сети, а также позволит в дальнейшем интегрировать объекты МПК в городскую систему [10].

Целью публикации данной статьи является определение основных принципов формообразования архитектурного образа объектов мусоросортировочных станций в контексте городской инфраструктуры.

Поставлены **следующие задачи**: изучить и систематизировать существующий зарубежный и отечественный опыт проектирования объектов МСС; провести обзор исторического развития сортировки мусора в России; определить основные принципы формообразования объектов МСС; предложить схемы модулей-объемов, составляющих объекты МСС.

Объект исследования – архитектурно-художественный образ зданий городских мусоросортировочных станций.

Степень изученности. При разработке темы исследования были изучены работы Говорушко С.М., Рыжих Ю.С., Рывкина М.Д., Рожкова Р.С. по вопросам экологических и технических особенностей обращения с отходами. Особое внимание было уделено исследованиям Павловского А.А., Вавиловой Т.Я., Сазыкиной Е.В., Попова Д.В., Блохина В.В., посвященным архитектурной типологии промышленных зданий и, в частности, зданий мусоропереработки и сортировки. Также были рассмотрены работы Иконникова А.В., Курбатова Ю.И. по общим вопросам формообразования и композиции в архитектуре. Изучены материалы международного опыта на

примере работ Boguslaw Wozniak, Jeannine Mullera и Ramaraj A., Nagammal J, которые отразили в своих материалах тенденции влияния технологий на формообразование. Большое внимание было уделено научным материалам, связанным с гуманизацией образа, был изучен труд научно-исследовательской группы Гарварда, над которым работали Georgoulas A., Kara H., Asensio Villoria L.

Методы исследования. Для определения основных принципов формирования архитектурно-художественного облика зданий МСС предлагается использовать следующие методы исследования:

1. Комплексный анализ зарубежного опыта размещения в городской среде объектов мусоропереработки, включающих мусоросортировочные блоки. Примеры изучены с точки зрения градостроительного размещения зданий от общего положения (выявление роли объекта в городской структуре, удаленность/приближенность к городским границам, исторической застройки) до частных особенностей участка размещения (определением расстояний до жилой застройки, объектов ландшафта и т. д.) и архитектурно-художественной составляющей облика завода (с точки зрения формообразования и интеграции объема в контексте городской среды с учетом историко-культурной составляющей). Выявлено технологическое и планировочное зонирование объекта.

2. Комплексный анализ отечественного опыта создания мусороперерабатывающих объектов. Определение градостроительного размещения предприятий относительно городских границ (наличие интеграции или ее отсутствие в городскую ткань, удаленность от жилой застройки), а также изучение архитектурно-планировочных и конструктивных приемов реализации зданий. Выявлено технологическое и планировочное зонирование объекта, а также определено наличие архитектурного решения его образа.

3. Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта для определения схожих черт и принципиальных различий в подходе к разработке архитектурно-художественного образа зданий мусоропереработки.

Процесс обращения с отходами несет в себе и социо-культурный характер, поэтому выполнен краткий обзор исторического опыта сортировки мусора в СССР и современной системы обращения с отходами в Российской Федерации. Выявлены существующие проблемы сортировки мусора и дальнейшие перспективы ее решения в ближайшем будущем.

Основная часть.

Анализ зарубежного опыта размещения в городской среде объектов мусоропереработки. Проблема сортировки мусора успешно решается в ряде стран благодаря комплексному подходу обращения с отходами на протяжении нескольких десятилетий: с одной стороны на уровне социальной работы с населением и внедрением первичного отбора ТБО, с другой стороны отказом от захоронений на полигонах в пользу переработки в заводских условиях. Более того, размещение объектов сортировки и переработки мусора происходит в городских границах, что заявляет об их градостроительной и архитектурной роли внутри городской среды.

Рассмотрены следующие объекты:

– завод Майсима (Япония, Осака). Предприятие работает со всеми видами отходов. Принцип работы – сжигание мусора экологичным способом. Градостроительное расположение – исторический центр города Осака, 12 км от главной достопримечательности города – замка в Осаке. В архитектурном облике здания использована стилизация вертикальных деталей, имеющих пластику исторических японских сооружений. Основной прямоугольный объем разделен ими визуально на более компактные плоскости. Колористика фасада задает активное цветовое решение, которое делает здание акцентным среди окружающей застройки, а высота основного объема выдержана в общей высотной отметке. Технологическая труба выполняет роль доминанты и уравнивает композицию (рис. 2);

– завод Шпиттлау (Австрия, Вена). Предприятие работает с так называемыми «смешанными» отходами. Принцип работы – сжигание мусора экологичным способом [11]. Градостроительное расположение – завод находится в центре города, в 6 км от Венской ратуши, внутри городской застройки. В архитектурном облике здания использованы вертикальные и горизонтальные членения фасадов, напоминающие фахверковую конструктивную систему (отсылка к исторической конструктивной системе, применяемой в строительстве зданий в XV веке). За счет данного приема основной объем здания получает уменьшенный масштаб, который позволяет вписать объект в городскую среду. Также на фасаде использованы яркие декоративные элементы и «активное» цветовое решение. Технологическая труба выполняет роль доминанты и смыслового стержня (рис. 3).

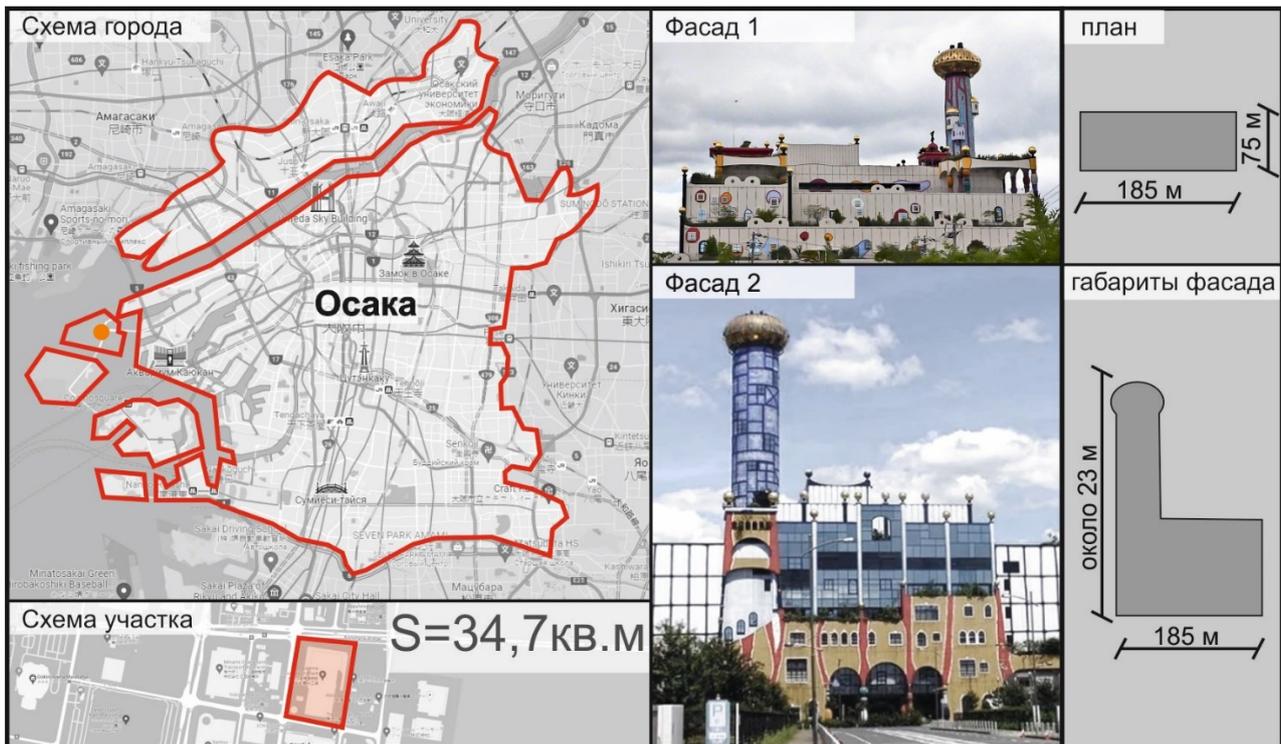


Рис. 2. Завод Майсима, Осака, Япония

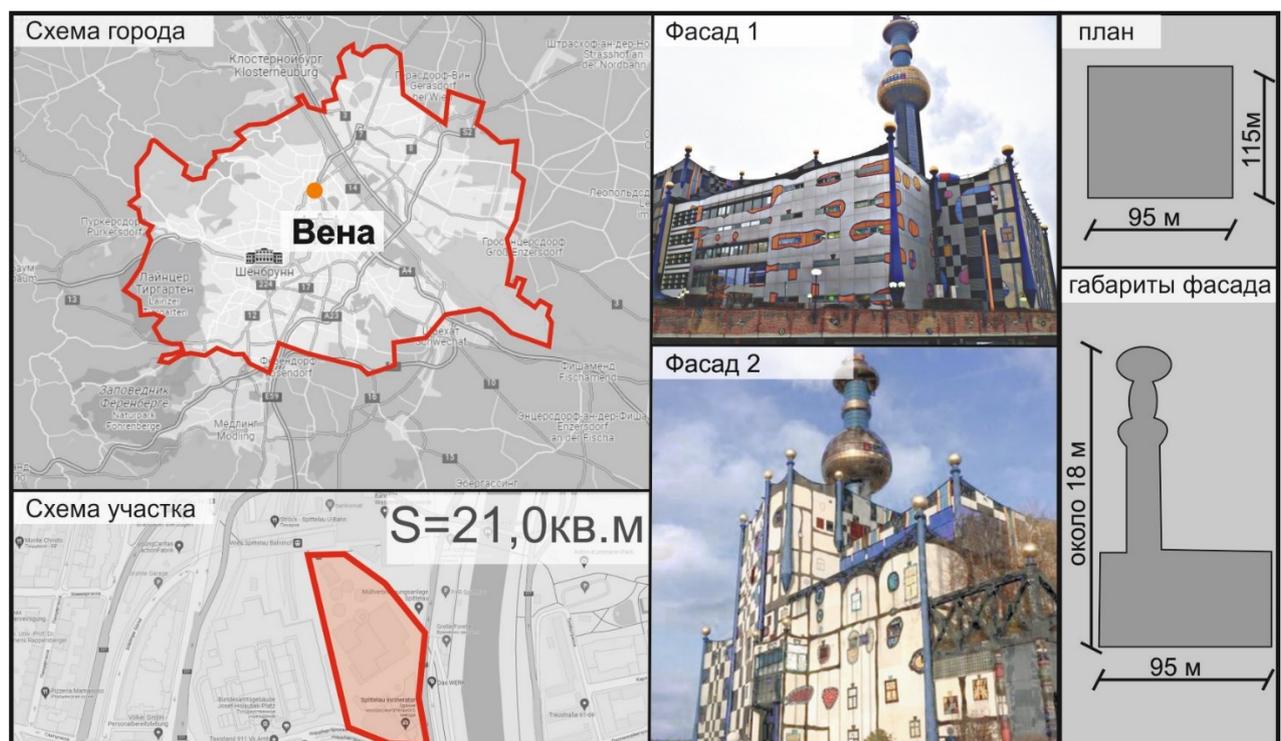


Рис. 3. Завод Шпителлау, Вена, Австрия

Представленные примеры объектов мусоропереработки выбраны в качестве положительных примеров международной практики организации заводов по сортировке и переработке мусора в городской среде. По функциональной организации они одновременно включают в себя блоки по сортировке и переработке мусора, с учетом введенной социальной практики первичной сортировки

мусора населением. Изученные примеры являются частью городской среды. Архитектурный образ «стилизован» в соответствии с исторической и культурной составляющей [12]. Несмотря на крупный объем, масштаб приведенных зданий «сглаживается» благодаря визуальному разделению на несколько объемов с помощью применен-

ния декоративных элементов: имитации исторических конструктивных систем и ярких цветовых пятен. Таким образом, происходит гуманизация облика зданий и создается их благоприятный образ для населения [13].

Обзор исторического опыта сортировки мусора в СССР и Российской Федерации. Изучение опыта сортировки мусора в СССР показало, что архитектура станций переработки мусора не представляла собой отдельно выделенной типологии, так как была встроена в здания магазинов, складов, в отдельных случаях это были здания производственного назначения, внешний облик которых соответствовал заводской архитектуре. Благодаря первичной сортировке мусора, а также отсутствию таких видов отходов как пластик, тетрапак и т. д., развитой системы зданий для сортировочных станций не требовалось. Пункты приема или сортировки отходов находились в черте города, более того в непосредственной близости к жилой застройке для возможности быстрого и доступного пути сдачи отходов.

После распада Советского Союза эта система обращения с отходами была утрачена. Как отмечают эксперты, в 1987 году в оборот вовлекалось более 70 % вторичных материалов, в современной же России этот показатель достигает пока только 50 % для промышленных отходов и порядка 4 % для ТКО [14]. В девяностых процесс сортировки мусора совершался по остаточному принципу. Отдельного управления или конкретного государственного органа – предприятия не существовало, но система культуры сортировки мусора населением еще имела свои отголоски. В 2000-ных она полностью прекратила свое существование. Именно с этого момента и начался глобальный рост полигонов ТКО [15].

На современном этапе попытки возродить переработку мусора предприняты в ряде городов России, но система обращения с отходами, утраченная после распада СССР не может быть восстановлена оперативно. Для этого требуется поэтапное решение проблемы. Одно из них – это строительство «мусоросортировочных» объектов [16].

Анализ отечественного опыта размещения объектов мусоросортировки. Проанализированы следующие отечественные объекты:

- Мусоросортировочный завод в Омске. Объект располагается на севере области. Общее количество объектов мусоропереработки в области – 2. Вопрос сортировки в системе городской

инфраструктуры не решен, нагрузка на областные транспортные сети возрастает. Оборудование размещается в большепролетных зданиях, где размещен конвейер. Архитектурное решение объекта не носит эстетической ценности. Архитектурно-художественное решение здания отсутствует (рис. 4).

- Мусоросортировочный завод во Владыкино, Московская область. Объект располагается в области за пределами населенных пунктов. Транспортная инфраструктура не решена. Конструктивная система здания – большепролетный каркас. Архитектурное решение объекта не носит эстетической ценности. Архитектурно-художественное решение здания отсутствует (рис. 5).

По итогам рассмотрения отечественных примеров можно сделать вывод, что с точки зрения градостроительного размещения данные предприятия расположены на периферии, непосредственно у городских границ. Объекты МСС и МПК не устраиваются в единые комплексы. Для уменьшения экономических затрат при строительстве используются простые объемно-пространственные решения с использованием большепролетных конструкций [17]. Это отвечает функциональным потребностям, но архитектурно-художественная составляющая полностью отсутствует.

Оба объекта сортируют мусор по таким категориям как: алюминий, картон, бумага, пластик и другие. Однако для переработки рабочие отбирают лишь 10 процентов мусора — остальной мусор захоранивается. Таким образом, вопросы увеличения свалок и минимизации нагрузки на дорожно-транспортные сети не решаются.

Комплексный анализ зарубежного и отечественного опыта выявил ряд схожих и отличительных черт объектов мусоросортировки. Так на градостроительном, и архитектурном уровне, объекты мусоропереработки и мусоросортировки Японии и Австрии, представляют собой единый комплекс, интегрированный в городскую среду, тогда как в России данные объекты не несут архитектурной ценности. Однако во всех приведенных примерах, технологический модуль сортировки мусора – это ключевой элемент, составляющий объекты мусоросортировочных станций. Технологический модуль имеет различные объемно-пространственные характеристики, в зависимости от интенсивности потоков производства и технологической направленности. Возможно сочетание нескольких модулей в одном объеме здания.

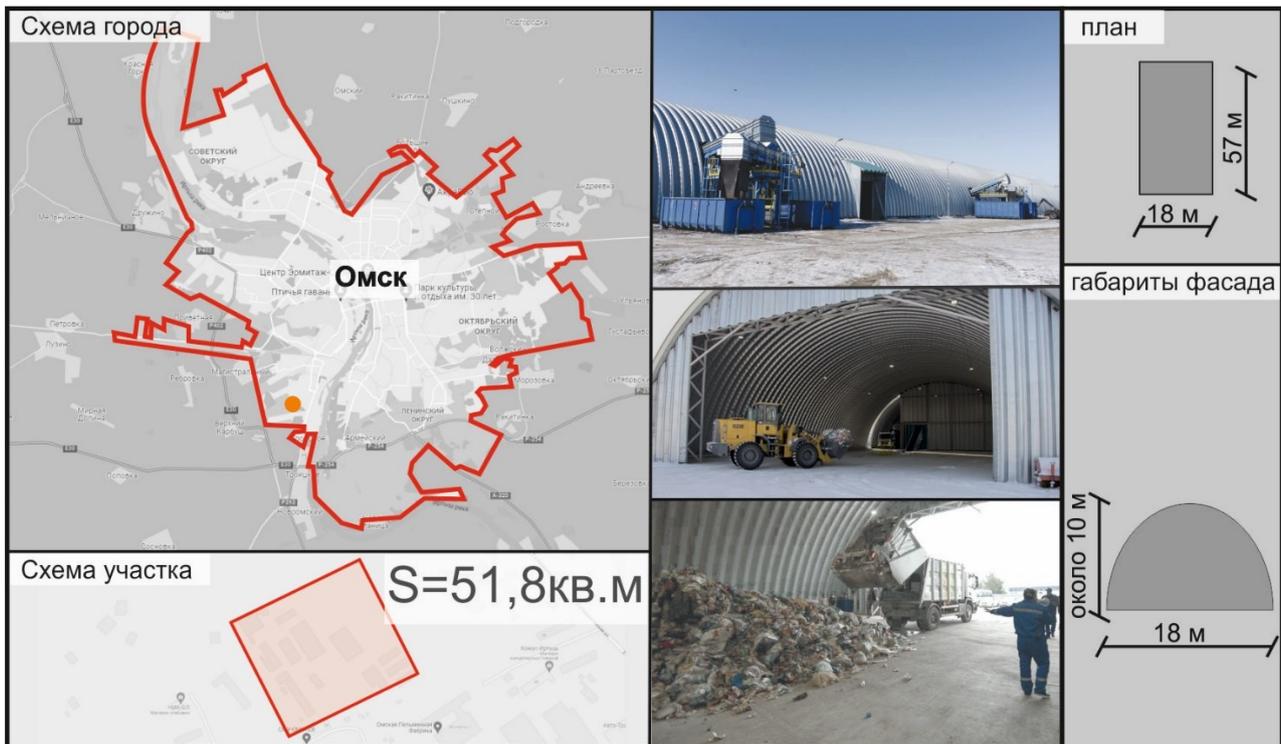


Рис. 4. Мусоросортировочный завод в Омске, Россия



Рис. 5. Мусоросортировочный завод во Владыкино, Московская область, Россия

Выводы. По результатам изучения существующего зарубежного и отечественного опыта проектирования зданий для сортировки и переработки бытовых отходов основными инструментами для интеграции объектов МСС в структуру городов России, в том числе и Санкт-Петербурга, с точки зрения архитектурно-градостроительной

составляющей можно считать следующие принципы [12, 18]:

- принцип «включенности» – включение здания мусоросортировочных станций в городскую среду, как полноценного элемента ее системы, с учетом создания благоустроенного внешнего пространства;

- принцип модульности – определение основных габаритов и объемов объекта исходя из его технологических характеристик. Главной составляющей технологического модуля является сортировочная лента, размещение которой может задавать формообразование модуля: линейное, многоуровневое, замкнутое и т. д. [19]. Поэтому возможно несколько комбинаций по организации специальных объектов:

- 1) Создание в черте города объектов МСС для отдельных категорий продуктов, имеющих в своем составе различные виды сырья [20];
- 2) Организация доступных мобильных пунктов МСС в каждом районе нацеленных на

прием и сортировку различного вида отходов, подразумевающих под собой коротко срочное временное расположение на минимальном по площади участке в тесной связи с городской застройкой.

- 3) Организация отдельных капитальных объектов МСС нацеленных на сортировку определённого вида мусора, рассчитанные на длительный срок работы [20].

- 4) Организация МСС объекта капитального строительства, с возможностью дальнейшего развития на базе данного строения объекта МПК.

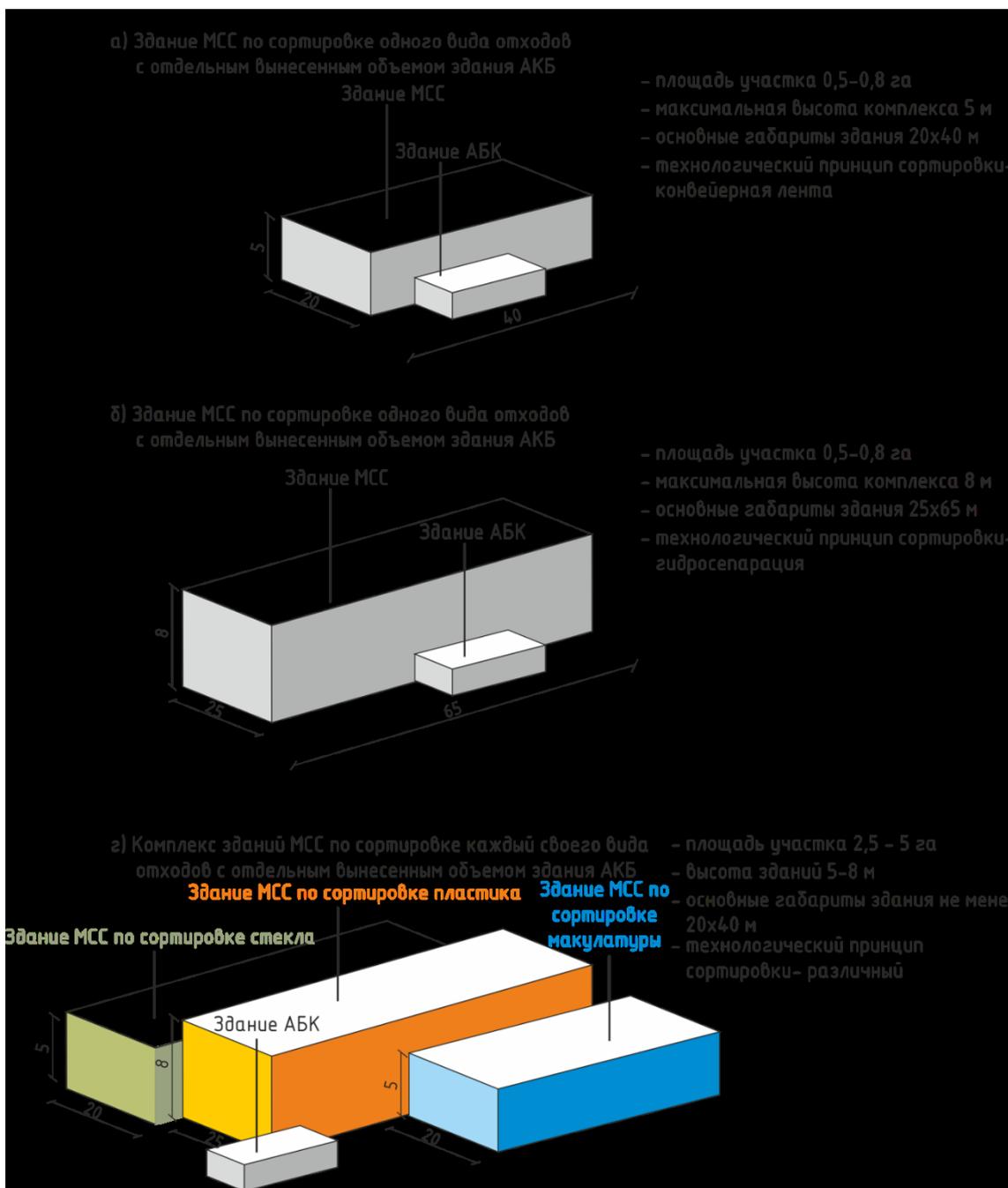


Рис. 6. Схемы компоновки модулей-объемов МСС

Из выведенных модулей-объемов komponуются различные композиционные ядра, в зависимости от участка проектирования и среды окружающей застройки объекта МСС в черте города, для сортировки определенного вида сырья [21] (см. рис. 6).

- принцип «исторической идентичности» – использование на фасадах форм и элементов, поддерживающих существующую архитектурную идентичность среды (архитектурный код города);

- принцип «гуманизации» – включение различных фасадных элементов и цветовых решений, для создания позитивного облика здания, то есть интеграция мусоросортировочных станций в городскую систему, с учетом архитектурно-художественной составляющей [22].

Выявленные принципы позволяют сформировать архитектурно-художественный облик зданий с учетом “кода города”, санитарных норм и новейших технологий по сортировке отходов, с учетом правил землепользования и застройки, а также высотного регламента местности. Другими словами, на основе полученных результатов возможно дальнейшее исследование вариантов формообразования объектов МСС и их габаритных характеристик в зависимости от предполагаемого территориального размещения в контексте городской среды, а также изучение вопросов оптимизации данных параметров не только с точки зрения технологии сортировки мусора, но и с точки зрения архитектурно-градостроительной составляющей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рожков Р.С. Совершенствование системы мотивации в области сортировки бытовых отходов // *Инновации. Наука. Образование*. 2020. №17. С. 261–265.
2. Рывкин М.Д., Бытовой мусор и мегаполис: проблемы утилизации // *Твердые бытовые отходы*. 2007. № 5 (11). С. 22–23.
3. Рыжих Ю.С. Проблема утилизации бытовых отходов // *Устойчивое развитие науки и образования*. 2019. № 10. С. 125–128.
4. Вавилова Т. Я., Коваленков И.О. Актуальные направления архитектурного проектирования объектов обращения с отходами // *Вестник СПбГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2016. №1(22). С. 91–96.
5. Говорушко С.М., Лазарев С., Петухов В.И., Зелинская Е.В. Обращение с твердыми коммунальными отходами: Россия на фоне мира // *Астраханский вестник экологического образования*. 2021. № 2 (62). С. 4–31.
6. Павловский А.А. К вопросу о размещении мусороперерабатывающих объектов на территории крупнейших городов России // *Астраханский вестник экологического образования*. 2020. № 4 (58). С. 44–56.
7. Бикбау М.Я. Новые технологии для обезвреживания и полной переработки бытовых отходов. М.: Изд-во ИТК «Дашков и К», 2020. 76 с.
8. Boguslaw Wozrzcicka. Landscape forms in the architecture of waste management facilities in cities // *ACTA Sci. Pol.* 2019. № 18(3). Pp. 87–102.
9. Супранович В.М. Основные задачи преобразования промышленных территорий городов, включающих объекты культурного наследия // *Сборник статей*. М: МАРХИ, 2018. С. 122–123.
10. Блохин В.В. Композиция в промышленной архитектуре. М.: Изд-во Стройиздат, 1977. 52 с.
11. Ramaraj A., Nagammal J. Exploring the ‘r’s and constructing the big picture of ‘recycling’ in architecture and construction industry // *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*. 2021. Т. 18. № 1. С. 153–169.
12. Сефeryн Л.А., Морозов В.Е., Шищенко Д.А. Сравнение стран Европы по мусороперерабатывающей отрасли // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 3 (50). С. 94–102.
13. Muller J. The Architecture of Waste Designing New Avenues for Public Engagement with Trash // *Ri-vista*. 2018. №1. Pp. 36–52. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/228596475.pdf> (дата обращения: 20.06.2022)
14. Яковлев А. Страна отходов. М.: Изд-во Индивидуум. 2021. 288 с.
15. Ляпунов К. Как в России обращались с отходами. – 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/articles/2020/04/10/musor/> (дата обращения: 15.10.2021)
16. Попов Д.В. Типология Современных Мусоросжигательных Заводов (ТБО) // *Архитектон: известия вузов*. 2018. №3(63). [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://cutt.ly/VXW5cw8> (дата обращения: 15.10.2021)
17. Сазыкина Е.В. Архитектура современных утилитарных промышленных объектов городской среды на примере мусороперерабатывающих заводов и станций по очистке сточных вод // *Мархи*. 2016. №2(35). С. 31–44.
18. Иконников А.В. Функция, форма, образ в архитектуре. М.: Изд-во Стройиздат, 1986. 288 с.
19. Михайлов В.В., Савостенко В.А. Особенности проектирования современных мусороперерабатывающих заводов // *Архитектура и дизайн*:

история, теория, инновация. 2018. № 3. С. 161–166.

20. Georgoulas A., Kara H., Asensio Villoria L. Architecture and Waste Management // Harvard Design Magazine. 2015. № 41. Pp. 40–47

21. Курбатов Ю.И. Условия формирования полноценной конфигурации архитектурной

формы // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 23–25.

22. Пирожков Д.С., Малыгин А.С. Мусороперерабатывающий комплекс как элемент для формирования комфортной жилой среды // Региональные архитектурно-художественные школы. 2011. №1. С.111–112.

Информация об авторах

Супранович Валерия Михайловна, кандидат архитектуры, архитектурный факультет, кафедра архитектурного проектирования. E-mail: vmsupranovich@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Сафронова Арина Дмитриевна, студент кафедры архитектурного проектирования. E-mail: arinasddd@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 18.08.2022 г.

© Супранович В.М., Сафронова А.Д., 2022

***Supranovich V.M., Safronova A.D.**

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

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

PRINCIPLES OF FORMATION OF ARCHITECTURAL AND ART SHAPE OF WASTE SORTING PLANT IN THE CONTEXT OF THE URBAN ENVIRONMENT

Abstract. *The article considers the actual topic of sorting and recycling of waste in large cities, namely the organization of special objects of sorting and recycling of waste, objects of the GCS (garbage collection stations), in the context of the city structure. The relevance of the proposed research topic is anchored in the material of the paper. The article is aimed at determining the basic principles of formation of architectural image at newly designed objects for sorting waste in the territory of Saint Petersburg. A comparative analysis of national and foreign experience was conducted, using the example of objects located within the boundaries of urban development. Based on the analysis of foreign and national experience in the design and implementation of such buildings, the problem of interaction of sorting complexes in the urban environment with the development environment has been identified. Common features and differences affecting the location of objects for sorting waste in the city structure in different countries have been identified. A brief review of historical trends in waste management in Russia was conducted. The main forming element - the technological module and its main components - has been identified. Based on the results of the study, the basic principles of formation of architectural and artistic appearance of the GCS (garbage collection stations) in the context of the urban environment have been determined. The diagrams of arrangement of modules-volumes of GCS with the basic dimensional characteristics of the section and volumes themselves are offered.*

Keywords: *waste sorting plant, architectural and art shape, formation, ecology, Saint Petersburg.*

REFERENCES

1. Rogkov R.S. Improving the incentive system for household waste sorting. [Sovershenstvovanie sistemy motivacii v oblasti sortirovki bytovykh othodov]. Innovacii. Nauka. Obrazovanie. 2020. No. 17. Pp. 261–265. (rus)

2. Rivkin M.D. Household waste and megacity: problems of recycling. [Bytovoj musor i megapolis: problemy utilizacii]. Municipal Solid Waste magazine. 2007. No. 5 (11). Pp. 22–23. (rus)

3. Ryzhikh Yu.S. The problem of disposal of domestic waste. [Problema utilizacii bytovykh othodov]. Sustainable development of science and education. 2019. No. 10. Pp. 125–128. (rus)

4. Vavilova T.Y., Kovalenkov I.O. Current directions of the architectural design of waste management plants. [Aktual'nye napravleniya arhitekturnogo proektirovaniya ob"ektov obrashcheniya s othodami]. Urban construction and architecture. 2016. Vol. 6. No. 1. Pp. 91–96. URL: <https://journals.eco-vector.com/2542-0151/article/view/54306/37648> (date of treatment: 20.03.2022). (rus)

5. Govorushko S., Lazarev S., Petukhov V., Zelinskaya E. An overview of municipal solid waste management: russia on the background of the world. [Obrashchenie s tverdymi kommunal'nymi othodami: Rossiya na fone mira]. Astrakhan Bulletin of

Ecological Education. 2021. No. 2 (62). Pp. 4–31. (rus)

6. Pavlovskii A. On the placement of waste processing facilities on the territory of the largest cities of Russia. [K voprosu o razmeshchenii musoropererabatyvayushchih ob"ektov na territorii krupnejshih gorodov Rossii]. Astrakhan Bulletin of Ecological Education. 2020. No. 4(58). Pp. 44–56. (rus)

7. Bikbau M. New technologies for the treatment and complete treatment of household waste [Novye tekhnologii dlya obezvrezhivaniya i polnoj pererabotki bytovyh othodov]. Dashkov & K. 2020. 76 p. (rus)

8. Boguslaw Wowrzeczka. Landscape forms in the architecture of waste management facilities in cities. ACTA Sci. Pol. 2019. No. 18(3). Pp. 87–102. URL: https://www.researchgate.net/publication/337646560_Landscape_forms_in_the_architecture_of_waste_management_facilities_in_cities (date of treatment: 20.06.2022)

9. Supranovich V. Main tasks of transformation of industrial areas of cities, including objects of cultural heritage [Osnovnye zadachi preobrazovaniya promyshlennyh territorij gorodov, vklyuchayushchih ob"ekty kul'turnogo naslediya]. Moscow Institute of Architecture (State Academy). 2018. Pp. 122–123. (rus)

10. Blohin V. Composition in Industrial Architecture. [Kompozitsiya v promyshlennoj arhitekture]. Stroyizdat. 1977. 52 p. (rus)

11. Ramaraj A., Nagammal J. Exploring the ‘r’s and constructing the big picture of ‘recycling’ in architecture and construction industry. A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture. 2021. Vol.18. No. 1. Pp. 153–169.

12. Seferyan L.A., Morozov V.E., Shishchenko D.A. Comparison of European countries in the waste industry. [Sravnenie stran Evropy po musoropererabatyvayushchej otrasli]. [Inzhenernyj vestnik Dona]. 2018. No 3(50). Pp. 94 – 102. (rus)

13. Jeannine Muller. The Architecture of Waste Designing New Avenues for Public Engagement with Trash. Ri-vista. 2018. No 1. Pp. 36 – 52. AdobeAcrobatReader. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/228596475.pdf> (date of treatment: 20.06.2022)

14. Yakovlev A. Waste land. [Strana othodov]. [Individum]. 2021. 288 p. (rus)

15. Lyapunov K. How waste was treated in Russia. [Kak v Rossii obrashchalis' s othodami] 2020. URL: <https://lenta.ru/articles/2020/04/10/musor/> (date of treatment: 15.10.2021)

16. Popov D. Typology of modern waste incinerators (MSW). [Tipologiya Sovremennyh Musoroszhitatel'nyh Zavodov (TBO)]. ARCHITECTON. Proceedings of higher education. 2018. No 3(63). AdobeAcrobatReader. URL: http://archvuz.ru/2018_3/9 (date of treatment: 20.10.2021)

17. Sazykina E. The architecture of modern industrial facilities in urban space on the example of garbage recycling plants and stations for wastewater treatment. [Arhitektura sovremennyh utilitarnyh promyshlennyh ob"ektov gorodskoj sredy na primere musoropererabatyvayushchih zavodov i stancij po ochistke stochnyh vod]. Moscow Institute of Architecture (State Academy). Architecture and modern information technologies. 2016. No. 2(35). Pp. 31–44. (rus)

18. Ikonnikov A. Function, shape, image in architecture. [Funkciya, forma, obraz v arhitekture]. Stroyizdat. 1986. 288 p. (rus)

19. Mihailov V., Savostenko V. Design features of modern waste processing plants. [Osobennosti proektirovaniya sovremennyh musoropererabatyvayushchih zavodov]. [Arhitektura i dizajn: istoriya, teoriya, innovatsiya]. 2018. No. 3. Pp. 161–166. (rus)

20. Georgoulas A., Kara H., Asensio Villoria L. Architecture and Waste Management. «Harvard Design Magazine». 2015. Pp. 40–47.

21. Kurbatov Yu. Conditions of forming a full-fledged configuration of the architectural form. [Usloviya formirovaniya polnocennoj konfiguratsii arhitekturnoj formy] [Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov] – Bulletin of Civil Engineers. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 2017. No. 4(63). Pp. 23–25. (rus)

22. Pirogkov D., Maligin A. Garbage processing complex as an element for the formation of a comfortable living environment. [Musoropererabatyvayushchij kompleks kak element dlya formirovaniya komfortnoj zhiloj sredy]. [Regional'nye arhitekturno-hudozhestvennye shkoly]. 2011. No 1. Pp.111–112. (rus)

Information about the authors

Supranovich, Valeria M. PhD. E-mail: vmsupranovich@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya st.,4.

Safronova, Arina D. Student. E-mail: arinasddd@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). Russia, 190005, Saint Petersburg, 2-ya Krasnoarmeiskaya st.,4

Received 18.08.2022

Для цитирования:

Супранович В.М., Сафронова А.Д. Принципы формирования архитектурно-художественного облика зданий мусоросортировочных станций в контексте городской среды // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 75–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-75-85

For citation:

Supranovich V.M., Safronova A.D. Principles of formation of architectural and art shape of waste sorting plant in the context of the urban environment. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 75–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-75-85

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93

*Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., *Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: gorodov-andreyu@mail.ru*

РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ТЕРМОСТОЙКОЙ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРОБИ ГИДРИДА ТИТАНА

Аннотация. В статье приводится описание технологии получения высокоэффективного композиционного радиационно-защитного материала, на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана и глинозёмистого цементного вяжущего. Исследованы физико-механические свойства полученного композита. Представлены результаты экспериментального исследования радиационно-защитных свойств композиционного материала на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана и глинозёмистого цемента по отношению к гамма- и нейтронному излучению. Для измерений использовались точечные изотопные источники быстрых нейтронов $Pu-\alpha-Be$ (энергия нейтронов – 4,5 МэВ), изотопный источник γ -излучения $Cs-137$ (энергия гамма-квантов – 0,661 МэВ) и изотопный источник γ -излучения $Co-60$ (средняя энергия γ -квантов – 1,25 МэВ). В работе приведено сравнение эффективности защиты на основе композита и бетона. Показано, что при одинаковой кратности ослабления нейтронного излучения толщина защиты из композита на основе модифицированной дроби гидрида титана и глинозёмистого цемента будет в ~ 1,7 раз меньше, чем из бетона. Использование композиционных материалов на основе модифицированной дроби гидрида титана и глинозёмистого связующего позволит существенно упростить технологию монтажа защиты, снизит ее массогабаритные характеристики, стоимость и повысит надежность.

Ключевые слова: гидрид титана, композит, радиационно-защитные свойства, глинозёмистый цемент, нейтронное излучение, гамма-излучение.

Введение. Несмотря на постоянное совершенствование режимов ядерной безопасности, вопрос обеспечения защиты от радиации на объектах ядерной энергетики является актуальным. Данный вопрос особо значим в связи с последними важными событиями на Белоярской АЭС: реактор БН-800 четвертого энергоблока впервые переведён на работу с полной загрузкой активной зоны уран-плутониевым МОКС-топливом и утверждением дорожной карты строительства пятого энергоблока с реактором БН-1200М [1]. Эти события важны для развития атомной отрасли нашей страны, в особенности для перехода к двухкомпонентной атомной энергетике с замыканием ядерного топливного цикла. Одновременно с этим немаловажное значение имеют вопросы создания высокоэффективных радиационно-защитных конструкционных материалов для обеспечения безопасного функционирования реакторной установки.

Необходимым свойством для радиационно-защитных материалов реакторов на быстрых нейтронах является их термическая стойкость и эффективное ослабление нейтронного и вторичного γ - излучений. Известно, что для эффективного замедления нейтронов требуются материалы с большим содержанием водорода. Одним из наиболее эффективных материалов нейтронной

защиты является гидрид титана, обладающий высоким содержанием водорода и сечением неупругого рассеяния нейтронов на ядрах титана [2–6]. Для повышения термической стабильности на поверхности гидрида титана создают многослойное покрытие, выполняющее функции ловушек и диффузионных барьеров водорода [7].

В данной работе представлены экспериментальные исследования радиационной стойкости и радиационно-защитных свойств композиционного материала на основе гидрида титана, содержащего электрохимически осажденное титановомедное покрытие $Ti(=Ti-O-Cu)Cu$, по отношению к γ - и нейтронному излучению точечных радиоизотопных источников в барьерной геометрии защиты.

Материалы и методы. В работе исследуется композиционный материал, состоящий из дроби гидрида титана, модифицированной титановомедным покрытием $Ti(=Ti-O-Cu)Cu$, глинозёмистого цемента, суперпластификатора и воды. Данный состав обусловлен тем, что для создания высокоэффективных радиозащитных композитов для реакторов на быстрых нейтронах необходимо добиться максимального содержания водородсодержащего материала, то есть дроби гидрида титана, а также плотности и подвижности композиционной смеси. Подвижность играет важную роль в случае заполнения

полостей конструкций радиационной защиты для исключения образования в них пустот. Материал получали методом виброуплотнения с частотой колебаний виброплощадки 3000 в минуту при амплитуде 0,5 мм, с последующим твердением в естественных (стандартных) условиях в течение 28 суток. Для исследований использовались композиционные блоки размером 200×200×100 мм (3 блока) и 200×200×50 мм (1 блок), дополнительно подвергшиеся термической обработке при 400 °С

до постоянной массы. Максимальная толщина слоя защиты составляла 35 см. Химический состав разработанного композиционного материала на глиноземистом цементе после рабочего режима сушки при 400 °С в течение 100 часов, представлен в таблице 1.

Физико-механические свойства разработанного композиционного материала на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана представлены в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав композита на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана и глиноземистого цемента, масс. %

TiH _{1,982}	Cu	Ti	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	CuO	H ₂ O
78,81	0,95	0,24	0,58	11,53	0,19	6,15	0,29	0,38	0,22	0,12	0,54

Таблица 2

Физико-механические свойства композита

Показатель	Численное значение
Объемная масса композиционной смеси, г/см ³	3,39±0,03
Плотность (28 суток твердения), г/см ³	3,36±0,03
Плотность (сушка 110 °С), г/см ³	3,33±0,03
Плотность (сушка 400 °С), г/см ³	3,28±0,03
Предел прочности при сжатии после 28 суток твердения (^{28 сут.} R _{сж}), МПа	38,2±1,2
^{28 сут.} R _{сж} (сушка 110 °С), МПа	42,4±1,2
^{28 сут.} R _{сж} (сушка 300 °С), МПа	41,5±1,2
^{28 сут.} R _{сж} (сушка 400 °С), МПа	40,5±1,2
Коэффициент подвижности смеси	1,76±0,10
Коэффициент теплопроводности при 20 °С, Вт/(м · К)	4,35
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) при	
20 °С	1,042
50 °С	1,046
100 °С	1,053
150 °С	0,926
200 °С	0,934
250 °С	0,942
300 °С	0,949
КЛТР, м · град ⁻¹	5,21 · 10 ⁻⁶

Ослабление плотности потоков нейтронов и мощности дозы γ -излучения измерялись в барьерной геометрии, когда источник излучения и детектор находятся не внутри исследуемой среды (бесконечная геометрия), а по обе стороны слоя защитного барьера заданной толщины. Блоки имели поперечный размер 20×20 см² и толщину от 10 до 35 см, что соответствует 2–3 длинам свободного пробега излучения. С боков блоки и детектор были окружены дополнительно блоками из свинца (при γ -облучении) или полиэтилена (при нейтронном облучении), что позволило снизить утечку излучений в поперечных направлениях.

Для измерений использовались точечные изотопные источники быстрых нейтронов Pu- α -

Ве с выходом нейтронов 5,67·10⁶ 1/сек (энергия нейтронов – 4,5 МэВ), изотопный источник γ -излучения ¹³⁷Cs, активностью 7,95·10⁹ Бк (энергия гамма-квантов – 0,661 МэВ) и изотопный источник γ -излучения ⁶⁰Co, активностью 4,16·10⁸ Бк (средняя энергия γ -квантов – 1,25 МэВ).

Основная часть. Измерения радиационных функционалов проводились при условиях, когда расстояние от детектора до источника было постоянным и соответствовало максимальной толщине защиты 35 см. Толщина композита набиралась согласно толщине каждого отдельного защитного блока. Кроме того, учитывалась поправка на геометрический центр детектирования (рис. 1).

При расчетах значение поправки для плотности потока быстрых нейтронов (Φ_b) и мощности дозы γ -квантов (P_γ) принято 2 см, а для плотности

потока промежуточных и быстрых нейтронов ($\Phi_{пр+б}$) – 7,6 см.

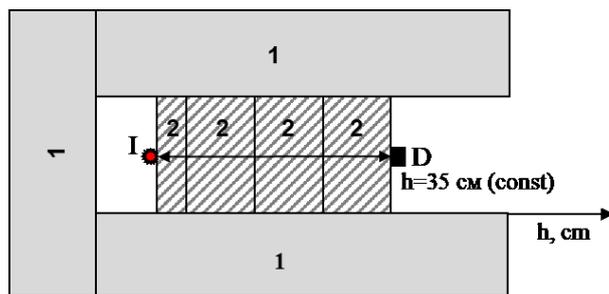


Рис. 1. Барьерная геометрия измерений ослабления нейтронного излучения от источника Pu- α -Be: 1 – экран из полиэтилена, 2 – защитный композит

Для замедления нейтронов, между исследуемым материалом и источником нейтронного излучения Pu- α -Be, размещали 8 см полиэтиленовый слой. Кроме того, проникновение быстрых нейтронов через слой полиэтилена способствует возникновению источника тепловых нейтронов необходимой мощности на его внешней поверх-

ности. На рисунке 2 представлена схема барьерной геометрии для измерения плотности потока тепловых нейтронов (Φ_T). В зависимости от толщины слоя защитного материала изменялось расстояние (h) между источником излучения и детектором. При интерпретации результатов учитывался фактор геометрического ослабления тепловых нейтронов ($1/h$).

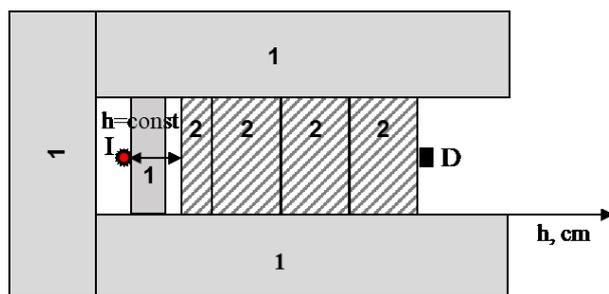


Рис. 2. Барьерная геометрия измерений ослабления плотности потока тепловых нейтронов от источника Pu- α -Be: 1 – экран из полиэтилена, 2 – защитный композит

Экспериментально полученные функции ослабления плотности потоков нейтронов различных энергий в композиционном материале на

основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана и глиноземистого цемента представлены на рисунке 3.

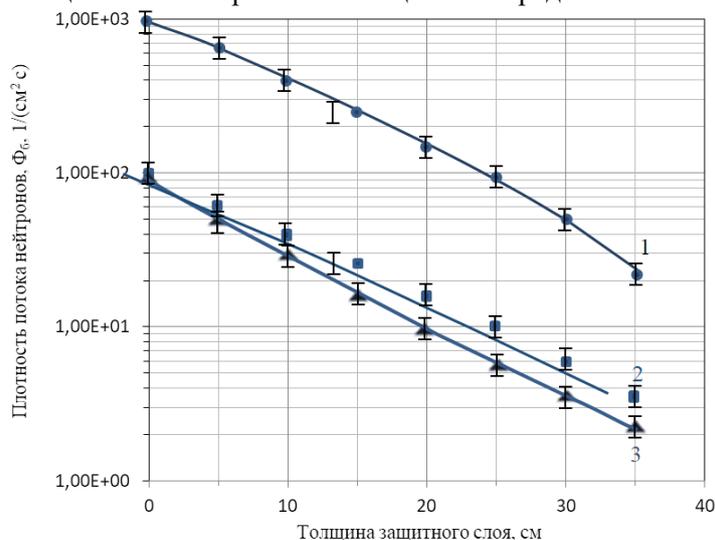


Рис. 3. Функции ослабления плотности потока нейтронного излучения Pu- α -Be источника композиционным материалом на основе модифицированной титановомедным покрытием дроби гидрида титана: 1 – быстрые нейтроны, 2 – промежуточные и быстрые нейтроны, 3 – тепловые нейтроны

Из представленных данных рисунка 3 следует, что функции ослабления имеют экспоненциальный характер, причем, начиная примерно с 15 см, крутизна их наклона становится практически одинаковой. Такой вид ослабления нейтронов характерен для водородосодержащих сред. Наиболее эффективное ослабление нейтронов на ядрах водорода происходит при их энергии не более $\sim 2,0\text{--}2,5$ МэВ за счет упругого рассеяния. Наиболее проникающими будут нейтроны с энергией больше 2,0 МэВ, так как чем больше энергия нейтронов, тем меньше сечение их упругого взаимодействия с водородом. При взаимодействии нейтронов данных промежуточных энергий с ядрами водорода происходит их быстрое замедление, так как в этой области энергии сечение взаимодействия нейтронов максимально. На расстоянии от источника превышающем более двух длин релаксации нейтронов источника, устанавливается равновесный спектр нейтронов, слабо изменяющийся с ростом толщины защиты.

В водородосодержащих композитах, начиная с определенной толщины, устанавливается равновесное распределение нейтронов всех энергий, в том числе и тепловых, то есть ослабление нейтронов всех энергетических групп происходит равномерно. При этом содержание водорода в материале влияет на степень ослабления нейтронного излучения. Наиболее интенсивно ослабление происходит с увеличением количества ядер водорода в 1 см^3 вещества. В гидриде титана при этом, в сравнение, например, с водой концентрация ядер водорода на 20 % больше ($8 \cdot 10^{22}$ $1/\text{см}^3$, против $6,5 \cdot 10^{22}$ $1/\text{см}^3$ для воды) [8]. При этом за счет более высокой плотности материала и наличия металлической составляющей, ослабление нейтронов происходит не только на водороде, но и на ядрах атома

титана. Причем сечение взаимодействия нейтронов на титане и водороде практически сопоставимо при энергии нейтронов около 3 МэВ [8-13].

Исходя из характера кривых рисунка 3, ослабление нейтронов починается экспоненциальному закону:

$$\Phi(d) = \Phi_0 \cdot e^{-d/\lambda}, \quad (1)$$

где Φ_0 – плотность потока нейтронов без защиты, $\Phi(d)$ – плотность потока нейтронов за слоем защиты толщиной d ; d – толщина защиты, см; λ – длина релаксации нейтронов, см.

Длина релаксации λ является величиной, характеризующей эффективность материала защиты. С физической точки зрения длина релаксации λ равна толщине слоя защиты, ослабляющей плотность потока нейтронов в e раз. То есть, чем меньше λ для соответствующего функционала, тем эффективнее защитные свойства материала.

На толщине слоя Δh длина релаксации определяется выражением:

$$\lambda = \frac{h_2 - h_1}{\ln \Phi_1(h_1) / \ln \Phi_2(h_2)}, \quad (2)$$

где Φ_1 и Φ_2 – плотность потока нейтронов на толщине композита h_1 и h_2 .

Таким образом, представленные данные показывают, что быстрые нейтроны при прохождении через композиционный материал защиты, состоящий из модифицированной дроби гидрида титана и глиноземистого цемента, способствуют пространственно-энергетическому распределению нейтронного излучения.

В таблице 3 приведены данные по длинам релаксации плотности потоков тепловых (Φ_T), промежуточных плюс быстрых ($\Phi_{\text{пр+б}}$) и быстрых (Φ_6) нейтронов на толщине защиты 20–35 см.

Таблица 3

Длины релаксации нейтронов в композите на основе дроби гидрида титана модифицированной титановомедным покрытием

Функционалы, $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	Φ_T	$\Phi_{\text{пр+б}}$	Φ_6
λ , см	$6,52 \pm 0,18$	$6,53 \pm 0,18$	$6,58 \pm 0,18$

Как видно из таблицы 3, значения длин релаксации для всех групп нейтронов близки и в среднем составляют $6,5 \pm 0,2$ см. Для сравнения, длина релаксации быстрых нейтронов для воды равна ~ 10 см, а для серпентинитового бетона $\sim 11,5$ см.

Следует отметить, что измерения проводились на композите после сушки до постоянной массы при $400\text{ }^\circ\text{C}$, плотностью $3,28\text{ г/см}^3$. Кроме того, средняя энергия нейтронов спектра Pu-а-Ве источника – $4,5$ МэВ, а спектр нейтронов деления ~ 2 МэВ, и, следовательно, для реакторного

спектра значения длин релаксации будут несколько меньше, приведенных в таблице 3.

На рисунке 4 приведен график зависимости ослабления мощности эквивалентной дозы γ -излучения точечных источников (цезий-137 и кобальт-60) от толщины защиты. Измерения функционалов проводили при постоянном расстоянии от источника до детектора равным 35 см с учетом геометрического центра детектирования (рисунок 5). Для функции ослабления мощности дозы γ излучения P_γ поправка на геометрический центр составляла 2 см.

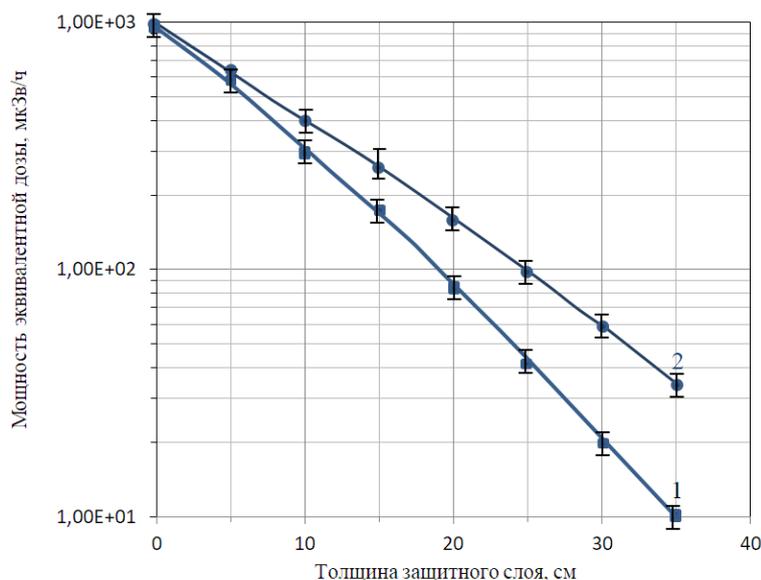


Рис. 4. Функции ослабления мощности эквивалентной дозы γ излучения изотопных источников на основе Cs-137 (1) и Co-60 (2) композита, наполненного модифицированной титановомедным покрытием дробью гидрида титана

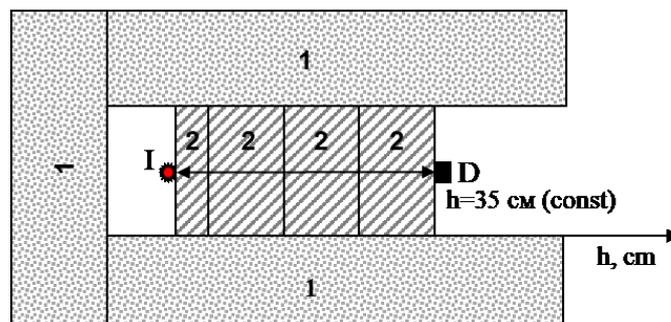


Рис. 5. Барьерная геометрия измерений ослабления γ излучения Cs-137 и Co-60 композитом на основе модифицированной титановомедным покрытием дробью гидрида титана:
1 –свинцовый экран, 2 – защитный композит

Из представленных на рисунке 4 данных видно, что оба распределения, как и для нейтронов, ослабляются по экспоненциальному закону, с сохранением монотонного наклона по всей толщине композита. Ослабление мощности эквивалентной дозы характеризуется постоянным значением длины релаксации ($\lambda\gamma$): $6,13 \pm 0,18$ см (источника Cs-137, $E\gamma = 0,661$ МэВ) и $7,81 \pm 0,18$ см (источник Co-60, $E = 1,25$ МэВ).

Таким образом, при плотности композиционного материала $3,2-3,3$ г/см³ длина релаксации γ -излучения для энергии 1,0–1,25 МэВ составляет 7,5–7,8 см, а для энергии нейтронов 4,5 МэВ – 6,5 см. Аналогичные данные для бетона, наполненного серпентинитом, который используется в защитных конструкциях реакторов на тепловых нейтронах, в 1,6–1,7 раз выше [14–15]. Следовательно, для достижения одинаковой кратности ослабления нейтронного излучения толщина защиты из композита на основе моди-

фицированной дробью гидрида титана и глиноземистого цемента будет в $\sim 1,7$ раз меньше, чем из серпентинитового бетона.

Использование композитов, состоящих из глиноземистого бетона, наполненного модифицированной дробью гидрида титана, позволит существенно упростить технологию монтажа защиты, снизит ее массогабаритные характеристики, стоимость и повысит надежность.

Выводы.

1. Описана технология получения композита, наполненного модифицированной дробью гидрида титана, и исследованы его физико-механические свойства.

2. Представлены экспериментальные результаты по определению функции ослабления нейтронного и γ - излучения композитным материалом на основе модифицированной титановомедным покрытием дробью гидрида титана и глиноземистого цемента.

3. Показано, что, начиная с 15 см толщины защиты ослабление быстрых, промежуточных и

тепловых нейтронов происходит с одинаковой интенсивностью, то есть наступает равновесное состояние нейтронов. Длина релаксации для нейтронного излучения, не зависимо от мощности дозы, в среднем составляет $6,5 \pm 0,2$ см, а для γ -излучения на 25–35 см слое защиты составляет $6,13 \pm 0,18$ см (для $E_\gamma = 0,661$ МэВ) и $7,81 \pm 0,18$ см (для $E_\gamma = 1,25$ МэВ). Это в 1,6–1,7 раза меньше, чем в бетоне с серпентинитовым наполнителем, то есть при одинаковой толщине материала эффективность защиты от нейтронного излучения разработанным композитом на основе электрохимически модифицированной дроби гидрида титана будет в 1,7 раз выше.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № FZWN-2020-0011 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергоблок БН-800 Белоярской АЭС после планового ремонта полностью перешёл на МОКС-топливо [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-beloyarskoj-aes/press-tsentr/novosti/41946 (дата обращения: 13.10.2022).
2. Шейченко М.С., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 15–19.
3. Неклюдов И.М., Воеводин В.Н. Современный статус радиационного материаловедения // X Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» Сборник трудов. Минск, Беларусь. 2013 г. С. 128–130.
4. Павленко З.В., Черкашина Н.И. К вопросу использования численного моделирования в разработке радиационно-защитных материалов // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 79–83.
5. Черкашина Н.И. Использование метода рентгенофазового анализа для изучения свойств модифицированного гидрида титана, подвергнутого термообработке // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 117–120.
6. Матюхин П.В. Неорганический радиационно-защитный металлокомпозиционный материал строительного назначения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 9. С. 35–39.
7. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И., Карнаухов А. А. Диффузионно-термические фазовые превращения в гидриде титана, содержащем многобарьерную систему ловушек водорода // Перспективные материалы. 2021. №6. С. 5–15.
8. Leys J.M., Zarins A., Cipa J., Baumann L., Kizane G., Knitter R. Radiation-induced effects in neutron- and electron-irradiated lithium silicate ceramic breeder pebbles // Journal of Nucl Mater. 2020. № 540. Pp. 152347. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2020.152347
9. Bonny G., Konstantinovic M. J., Bakaeva A., Yin C., Castin N., Mergia K., Chatzikos V., Dellis S., Khvan T., Bakaev A., Dubinko A., Terentyev D. Trends in vacancy distribution and hardness of high temperature neutron irradiated single crystal tungsten // Journal of Acta Materialia. 2020. № 198. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.07.047
10. Holmes-Siedle A., Van Lint A.J. Radiation Effects in Electronic Materials and Devices // Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). 2003. Pp. 523–559. DOI: 10.1016/B0-12-227410-5/00644-X
11. Шульпеков А.М., Лепаква О.К., Радишевская Н.И. Фазо- и структурообразование в системе TiO₂-Al-C в процессе CBC // Chemical Bulletin. 2018. № 1. Т. 1. С. 4–11.
12. Larionov V.V., Varlachev V.A., Shupeng Xu. Accumulation of hydrogen in titanium exposed to neutron irradiation // Journal of Hydrogen Energ. 2020. № 45. Vol. 30. Pp. 15294–15301. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.014
13. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Смоликов А.А. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. 2006. № 2. С. 47–50.
14. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронцов Д.В. Радиационно-защитный тяжелый бетон на основе железорудного минерального сырья // Известия вузов. Строительство. 2007. № 4. С. 40–42.
15. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронцов Д.В. Тяжелый бетон для защиты от ионизирующих излучений // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 2–4.

Информация об авторах

Ястребинский Роман Николаевич, доктор технических наук, директор химико-технологического института. E-mail: yrndo@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Карнаухов Александр Алексеевич, младший научный сотрудник кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: gamma.control@ya.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Павленко Вячеслав Иванович, доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Городов Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: gorodov-andreyu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Акименко Анастасия Владиславовна, аспирант. E-mail: nastya-akimenko.2602@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Фанина Евгения Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: evgenia-@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.10.2022 г.

© Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А., 2022

Yastrebinsky R.N., Karnaukhov A.A., Pavlenko V.I., *Gorodov A.I., Akimenko A.V., Fanina E.A.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: gorodov-andreyu@mail.ru

RADIATION-PROTECTIVE CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE BASED ON A HEAT-RESISTANT MODIFIED FRACTION OF TITANIUM HYDRIDE

Abstract. The article describes the technology of obtaining a highly effective composite radiation-protective material based on titanium-coated fraction of titanium hydride and alumina cement binder. The physical and mechanical properties of the resulting composite are investigated. The results of an experimental study of the radiation-protective properties of a composite material based on a titanium-coated titanium hydride and alumina cement fraction with respect to gamma and neutron radiation are presented. Point isotopic sources of fast neutrons Pu- α -Be (neutron energy - 4.5 MeV), isotopic source of gamma radiation Cs-137 (gamma-ray energy - 0.661 MeV) and isotopic source of gamma radiation Co-60 (average energy of gamma-quanta - 1.25 MeV) are used for measurements. The paper compares the effectiveness of protection based on composite and concrete. It is shown that with the same attenuation multiplicity of neutron radiation, the thickness of the protection from a composite based on a modified fraction of titanium hydride and alumina cement will be in ~ 1.7 times less than that of concrete. The use of composite materials based on a modified fraction of titanium hydride and alumina binder will significantly simplify the technology of mounting protection, reduce its weight and size characteristics, cost and increase reliability.

Keywords: titanium hydride, composite, radiation-protective properties, alumina cement, neutron radiation, gamma radiation.

REFERENCES

1. The BN-800 power unit of the Beloyarsk NPP after scheduled repairs has completely switched to MOX fuel [Energoblok BN-800 Beloyarskoj AES posle planovogo remonta polnost'yu pereshyol na MOKS-toplivo]. URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-beloyarskoj-aes/press-tsentr/novosti/41946 (date of treatment: 13.10.2022).
2. Sheichenko M.S., Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu. Modern composite radiation-protective materials for construction purposes [Sovremennye kompozicionnye radiacionno-zashchitnye materialy stroitel'nogo naznacheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 5. Pp. 15–19. (rus)
3. Neklyudov I.M., Voevodin V.N. The modern status of radiation materials science [Sovremennyy status radiacionnogo materialovedeniya]. X

Mezhdunarodnaya konferenciya «Vzaimodejstvie izluchenij s tverdyim telom» Sbornik trudov. Minsk, Belarus. 2013. Pp. 128–130. (rus)

4. Pavlenko Z.V., Cherkashina N.I. On the use of numerical modeling in the development of radiation-protective materials [K voprosu ispol'zovaniya chislennogo modelirovaniya v razrabotke radiacionno-zashchitnyh materialov]. V sbornike: Energo-i resursosbergayushchie ekologicheski chistye himiko-tekhnologicheskie processy zashchity okruzhayushchej sredy Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. 2015. Pp. 79–83. (rus)

5. Cherkashina N.I. Using the method of X-ray phase analysis to study the properties of modified titanium hydride subjected to heat treatment [Ispol'zovanie metoda rentgenofazovogo analiza dlya izucheniya svojstv modificirovannogo gidrida titana, podvergnutogo termoobrabotke]. V sbornike: Energo-i resursosbergayushchie ekologicheski

chistye himiko-tehnologicheskie processy zashchity okruzhayushchej sredy Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya. 2015. Pp. 117–120. (rus)

6. Matyukhin P.V. Inorganic radiation-protective metal-composite material for construction purposes [Neorganicheskiy radiacionno-zashchitnyj metallokompozicionnyj material stroitel'nogo naznacheniya]. News of higher educational institutions. Construction. 2007. No. 9. Pp. 35–39. (rus)

7. Yastrebinsky R.N., Bondarenko G.G., Pavlenko V.I., Karnaukhov A. A. Diffusion-thermal phase transformations in titanium hydride containing a multi-quality system of hydrogen traps [Difuzionno-termicheskie fazovye prevrashcheniya v gidride titana, sodержashchem mnogobar'ernuyu sistemu lovushek vodoroda]. Perspektivnye materialy. 2021. No. 6. Pp. 5–15. (rus)

8. Leys J.M., Zarins A., Cipa J., Bauman L., Kizane G., Knitter R. Radiation-induced effects in neutron- and electron-irradiated lithium silicate ceramic breeder pebbles. Journal of Nucl Mater. 2020. No. 540. 152347. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2020.152347

9. Bonny G., Konstantinovic M. J., Bakaeva A., Yin C., Castin N., Mergia K., Chatzikos V., Dellis S., Khvan T., Bakaev A., Dubinko A., Terentyev D. Trends in vacancy distribution and hardness of high temperature neutron irradiated single crystal tungsten. Journal of Acta Materialia. 2020. No. 198. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.07.047

10. Holmes-Siedle A., Van Lint A.J. Radiation Effects in Electronic Materials and Devices. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). 2003. Pp. 523–559. DOI: 10.1016/B0-12-227410-5/00644-X

11. Shulpekov A.M., Lepakova O.K., Radishevskaya N.I. Phase- and structural formation in the TiO₂-Al-C system in the SHS process [Fazovoe i strukturoobrazovanie v sisteme TiO₂-Al-C v processe SVS]. Chemical Bulletin. 2018. No. 1. Vol. 1. Pp. 4–11. (rus)

12. Larionov V.V., Varlachev V.A., Shupeng Xu. Accumulation of hydrogen in titanium exposed to neutron irradiation. Journal of Hydrogen Energ. 2020. No. 45. Vol 30. Pp. 15294–15301. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.014

13. Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Smolnikov A.A. Radiation-protective concrete for biological protection of nuclear reactors [Radiacionno-zashchitnyj beton dlya biologicheskoy zashchity yadernyh reaktorov]. Perspektivnye materialy. 2006. No. 2. Pp. 47–50. (rus)

14. Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Voronov D.V. Radiation-protective heavy concrete based on iron ore mineral raw materials [Radiacionno-zashchitnyj tyazhelyj beton na osnove zhelezorudnogo mineral'nogo syr'ya]. News of universities. Construction. 2007. No. 4. Pp. 40–42. (rus)

15. Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Voronov D.V. Heavy concrete for protection from ionizing radiation [tyazhelyj beton dlya zashchity ot ioniziruyushchih izluchenij]. Building materials. 2007. No. 8. Pp. 2–4. (rus)

Information about the authors

Yastrebinsky, Roman N. DSc. E-mail: yrndo@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Karnaukhov, Alexander A. Junior researcher. E-mail: gamma.control@ya.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Pavlenko, Vyacheslav I. DSc. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Gorodov, Andrey I. PhD. E-mail: gorodov-andrey@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Akimenko, Anastasia V. PhD student. E-mail: nastya-akimenko.2602@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Fanina, Evgenia A. DSc. E-mail: evgenia@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 13.10.2022

Для цитирования:

Ястребинский Р.Н., Карнаухов А.А., Павленко В.И., Городов А.И., Акименко А.В., Фанина Е.А. Радиационно-защитные характеристики композита на основе термостойкой модифицированной дроби гидроксида титана // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 86–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93

For citation:

Yastrebinsky R.N., Karnaukhov A.A., Pavlenko V.I., Gorodov A.I., Akimenko A.V., Fanina E.A. Radiation-protective characteristics of a composite based on a heat-resistant modified fraction of titanium hydride. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 86–93. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-86-93

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-94-113

¹Романенко А.А., ²Бузов А.А., ^{1,2}Чуев В.П., ¹Дороганов В.А., ¹Онищук В.И., ¹Фанина Е.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²АО «Опытно-экспериментальный завод «ВладМиВа»»

*E-mail: neanas@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФТОРСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

Аннотация. В статье представлены результаты проведенного сравнительного анализа стоматологических стеклоиономерных цементов (СИЦ): «AHfil+» (AHL, Соединенное королевство), «Ketac Molar EasyMix» (3M ESPE, США), «Fuji IX GP» (GC, Япония), «ProGlass Nine» (Silmet, Израиль), «Полиакрилин» (ТехноДент, Россия), «Цемион» (ВладМиВа, Россия), «Кемфил» (СтомаДент, Россия) и «Глассин Рест» (Омега-Дент, Россия) по рабочему времени, времени твердения, прочности при сжатии, рентгеноконтрастности, микроструктуре и химическому составу. Показано, что основным компонентом порошков данных СИЦ является измельченное кальциевое («Кемфил»), стронциевое («AHfil +», «Цемион» и «Fuji IX GP»), кальциево-стронциевое («ProGlass Nine», «Полиакрилин» и «Глассин Рест») и лантан-кальциевое алюмофторсиликатное стекло («Ketac Molar EasyMix»). Все они содержат фосфор. Различия порошков по гранулометрическому составу свидетельствуют о различии в технологии помола стекла при их получении. Рабочее время исследованных СИЦ составляет от 1 до 3,5 минут. Требованиям ГОСТ 31578-2012 и ISO 9917-1:2007 не соответствуют по прочности «ProGlass Nine» (36 ± 3 МПа), «Кемфил» (68 ± 6 МПа) и «Глассин Рест» (104 ± 5 МПа), по времени твердения - «ProGlass Nine». «Fuji IX GP» имеет самую высокую прочность (201 ± 33 МПа), остальные СИЦ от 142 до 169 МПа. Все исследованные СИЦ, за исключением нерентгеноконтрастного «ProGlass Nine», обладают рентгеноконтрастностью, соответствующей 1 мм алюминия. По результатам проведенных испытаний рекомендованы для клинического применения врачами-стоматологами «AHfil+», «Ketac Molar EasyMix», «Fuji IX GP», «Полиакрилин» и «Цемион».

Ключевые слова: стеклоиономерный цемент, алюмофторсиликатное стекло, стоматологический материал, стоматология.

Введение. Материалы на основе алюмофторсиликатного стекла нашли широкое применение стоматологии для временного и постоянного пломбирования зубов [1–4], в том числе по ART-методике (атравматическое восстановительное лечение) [5–8]. Такие материалы называют стоматологическими стеклоиономерными цементами (СИЦ). Их отверждение происходит в результате реакции взаимодействия порошка алюмосиликатного стекла и водного раствора полиалкенаатной кислоты или порошкообразной смеси алюмосиликатного стекла и полиакриловой кислоты с водой или водным раствором винной кислоты [9, 10]. При смешивании двух компонентов (порошка и жидкости) происходит поперечное сшивание молекул полимерных кислот ионами, экстрагированными из стекла и отверждение стеклоиономерного цемента [11–13].

Зубочелюстно-лицевая система выполняет функцию первичной обработки пищи, а зубы, являясь ее частью, испытывают развиваемую жевательными мышцами и регулируемую рецепторами пародонта силу – жевательное давление. Стоматологические материалы для восстановления зубов должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать жевательную нагрузку в условиях полости рта. Удобство работы со стоматологическим стеклоиономерным цементом

определяется его сроками схватывания. Это обусловлено тем, что процесс пломбирования зуба или фиксации ортопедической конструкции необходимо успеть закончить до начала схватывания цемента. С другой стороны, конец схватывания должен наступать максимально быстро после начала схватывания. Удлинение интервала между началом и концом схватывания приводит к связанным с ожиданием неудобствам для пациента. На процесс отверждения стеклоиономерного цемента и приемлемость его функциональных характеристик в значительной мере влияет химический состав стекла, входящего в состав порошка СИЦ [14]. Также важна рентгеноконтрастность цемента, так как данное свойство позволяет врачу-стоматологу легко визуализировать его на снимках, оценивать качество лечения и проводить динамическое наблюдение. В связи с вышеизложенным, а также с учетом требований ГОСТ 31578–2012 и международного стандарта ISO 9917–1:2007, критериями оценки СИЦ были выбраны: рабочее время, время твердения, прочность при сжатии, рентгеноконтрастность, микроструктура и химический состав.

Материалы и методы. Микроструктура СИЦ оценивалась методом сканирующей электронной микроскопии на «TM3030» (Hitachi,

Япония). Химический состав определялся методом энергодисперсионной спектроскопии при помощи системы рентгеновского энергодисперсионного микроанализа «Quantax EDS» (Bruker Nano GmbH, Германия) и микроскопа «TM3030» (Hitachi, Япония).

Гранулометрический состав определялся методом лазерной дифракции света с технологией PIDS на универсальном жидкостном модуле анализатора размера частиц «LS 13 320» (Beckman Coulter, США) с ультразвуковым гомогенизатором. Применение данного оборудования обеспечивает соответствие испытания требованиям международного стандарта ISO 13320:2020. В качестве среды применялась дистиллированная вода.

Испытание рабочего времени, времени твердения, прочности при сжатии и рентгеноконтрастности СИЦ проводили в соответствии с ГОСТ 31578–2012. Условия проведения испытаний характеризовались стабильной температурой 23 ± 1 °С и относительной влажностью воздуха не менее 30 %.

Рабочее время исследуемых образцов определяли, как интервал времени от начала смешивания до момента, когда цементное тесто при дальнейшем манипулировании теряет свою пластичность. Для определения времени твердения цементным тестом заполнялась металлическая форма, которая через минуту после окончания смешивания помещалась в термостат при 37 ± 1 °С. В образец вертикально опускалась игла прибора Вика. Фиксировался момент, когда игла при погружении прекращает оставлять четкий полный отпечаток. Время твердения - интервал от момента завершения замешивания цемента до момента исчезновения отпечатка иглы на поверхности цементного образца.

При изготовлении пяти образцов для исследования на прочность форму заполняли цементным тестом, уплотняя шпателем, и помещали ее в термостат на один час. Образцы извлекали из формы и помещали в емкости с дистиллированной водой в термостат электрический сушевоздушный «ТС-80М-2» (Медлабортехника, Украина) при температуре 37 ± 1 °С. Через 24 часа после окончания смешивания образцы исследовали на прочность путем прикладывания к ним сжимающей нагрузки в направлении продольной оси. Применяли испытательную машину «Instron 3345» (Instron–division of ITW Limited, США) со скоростью движения траверсы 1 мм/мин. Фиксировали значение нагрузки, при которой произошло разрушение образца. Рассчитывали среднее значение и среднеквадратическое отклонение с применением поставляемого с оборудованием программного обеспечения.

При определении рентгеноконтрастности на рентгеновской стоматологической пленке, помещенной на свинцовую пластину, располагали образцы исследуемых СИЦ толщиной 1 мм и диаметром 15 мм, а также алюминиевый ступенчатый клин толщиной от 1 до 8 мм со ступенями высотой 1 мм. При помощи высокочастотного портативного рентген-аппарата «DX3000» (DEXCOWIN, Корея) облучали пленку, а затем проявляли ее. Оценка рентгеноконтрастности проводили путем визуального сравнения по плотности степени почернения пленки на месте изображения исследуемых образцов СИЦ и алюминиевого ступенчатого клина. Материал считается рентгеноконтрастным, если плотность почернения пленки в месте изображения испытуемого образца меньше плотности почернения пленки в месте изображения первой ступеньки алюминиевого клина толщиной 1 мм.

Основная часть. Проведен сравнительный анализ стоматологических стеклоиономерных цементов: «АНfil+» (АНL, Соединенное королевство), «Ketac Molar Easymix» (3M ESPE, США), «Fuji IX GP» (GC, Япония), «ProGlass Nine» (Silmet, Израиль), «Полиакрилин» (ТехноДент, Россия), «Цемион» (ВладМиВа, Россия), «Кемфил» (СтомаДент, Россия) и «Глассин Рест» (Омега-Дент, Россия). Результаты анализа химического состава порошков СИЦ представлены в таблице 1. На рисунках 1 – 8 представлены фрагменты энергодисперсионных спектров порошков СИЦ.

По результатам химического анализа СИЦ методом энергодисперсионной спектроскопии для всех образцов выявлены пики наибольшей интенсивности, соответствующие следующим химическим элементам: Si, Al и O, а также менее интенсивные пики обнаружены для элементов F и P. На основании того, что для «АНfil +», «Цемион» и «Fuji IX GP» выявлен пик Sr, можно сделать вывод о том, что данные СИЦ изготовлены из стеклонеполнителей на основе стронций-алюмо-фтор-силикатных стекол. На основе стеклонеполнителя из кальций-алюмо-фтор-силикатного стекла изготовлен «Кемфил», имеющий пик, соответствующий Ca. Для «ProGlass Nine», «Полиакрилин» и «Глассин Рест» выявлены пики, соответствующие Sr и Ca. Для «Ketac Molar Easymix» выявлены пики, соответствующие Ca и La. В соответствии с инструкцией по применению «Глассин Рест» должен содержать лантан, однако пика, соответствующего лантану, для данного СИЦ не выявлено.

Помимо базовых элементов все исследованные СИЦ содержат от 0,15 до 4,26 % натрия, от 0,13 до 3,84 % бария, от 0,10 до 0,22 % магния, а также от 1,76 до 5,29 % фосфора. Содержание

фтора в них составляет 6,25 – 20,71 %, при этом наименьшим характеризуется «Цемион», а наибольшим – «Глассин Рест».

Таблица 1

Химический состав порошков СИЦ

Элемент	Содержание, масс. %							
	АНfil +	Ketac Molar Easymix	Fuji IX GP	ProGlass Nine	Полиакрилин	Цемион	Кемфил	Глассин Рест
O	35,12±4,4	27,10±2,9	34,50±3,8	40,49±4,2	32,05±3,6	36,05±4,5	37,63±3,7	26,43±3,0
Al	17,07 ±0,9	12,01±0,5	14,89±0,7	14,79±0,6	14,77±0,7	19,53±1,0	15,83±0,7	13,09±0,6
Si	15,00±0,7	12,58±0,5	14,44±0,6	19,62±0,8	13,56±0,6	11,56±0,5	12,72±0,5	12,38±0,5
Ca	–	12,18±0,4	–	1,70±0,1	1,36±0,1	–	9,00±0,3	6,69±0,2
Sr	16,76±0,7	-	18,00±0,7	9,33±0,4	16,73±0,7	20,41±0,9	-	7,37±0,3
F	10,85±1,6	11,84±1,4	13,84±1,6	9,60±1,2	14,79±1,8	6,25±1,0	18,41±1,9	20,71±2,4
P	4,52±0,2	2,02±0,1	1,76±0,1	2,12±0,1	3,54±0,2	5,29±0,2	3,04±0,1	2,65±0,1
Na	0,31±0,0	2,24±0,2	1,29±0,1	1,86±0,1	0,29±0,0	0,15±0,0	2,92±0,2	4,26±0,3
Ba	0,18±0,0	0,83±0,0	1,06±0,1	0,25±0,0	2,42±0,1	0,57±0,0	0,13±0,0	3,84±0,1
La	–	18,72±0,5	–	–	–	–	–	–
K	–	0,18±0,0	–	–	–	–	0,15±0,0	–
Mg	0,19±0,0	0,13±0,0	0,22±0,0	0,10±0,0	0,19±0,0	0,20±0,0	0,16±0,0	0,16±0,0
Zn	–	0,16±0,0	–	0,13±0,0	0,30±0,0	–	–	2,43±0,1

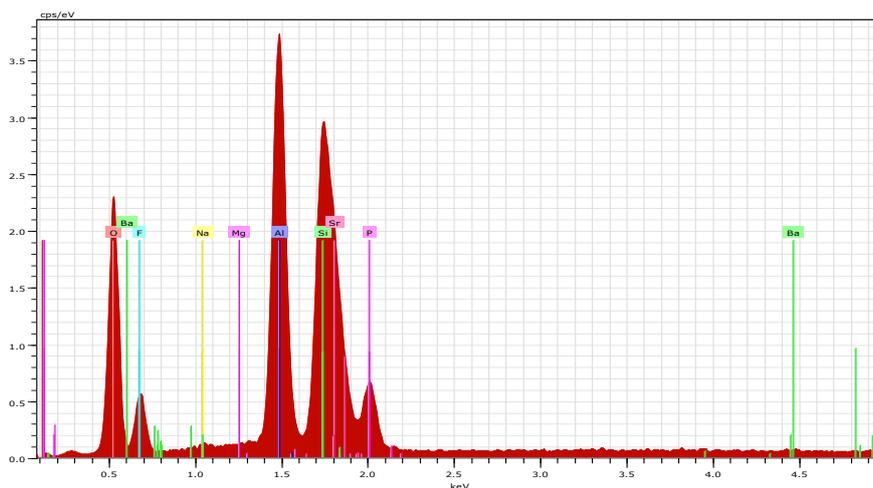


Рис. 1. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «АНfil +»

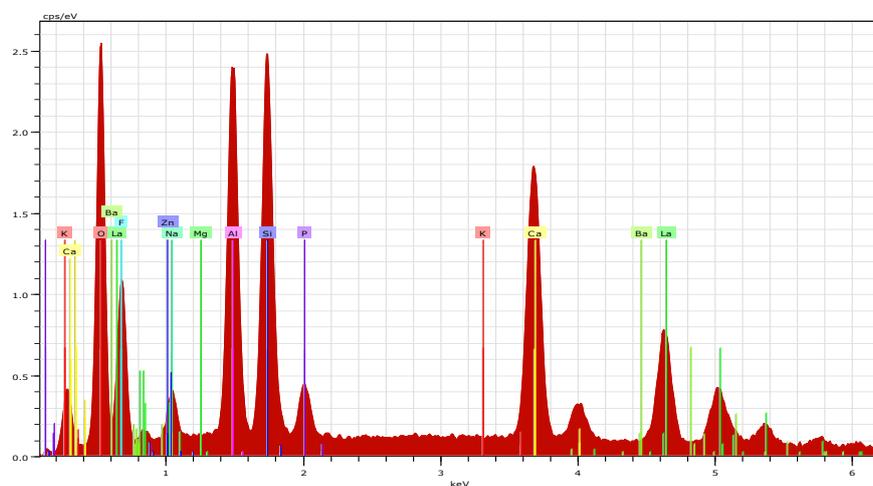


Рис. 2. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «Кетас Molar Easymix»

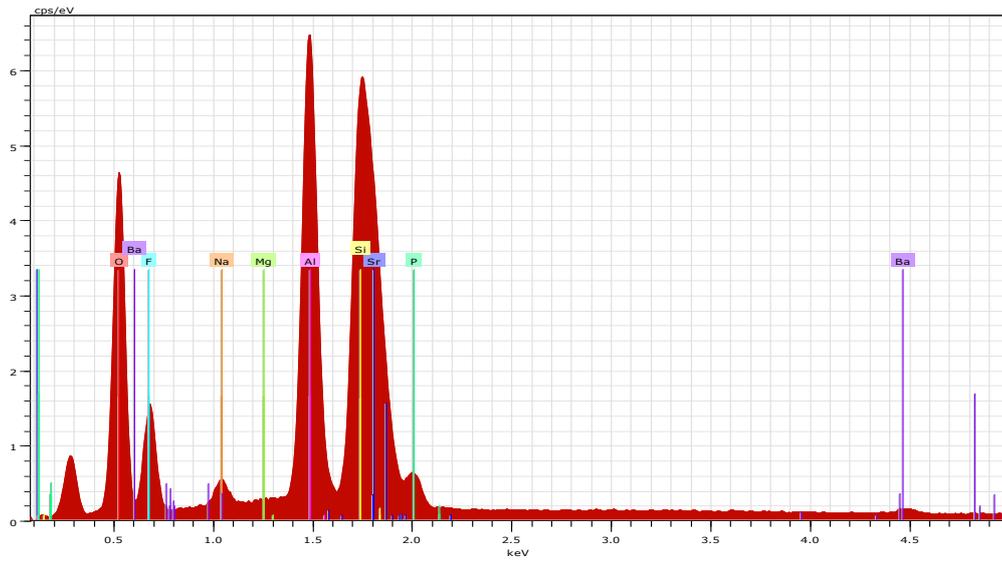


Рис. 3. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «Fuji IX GP»

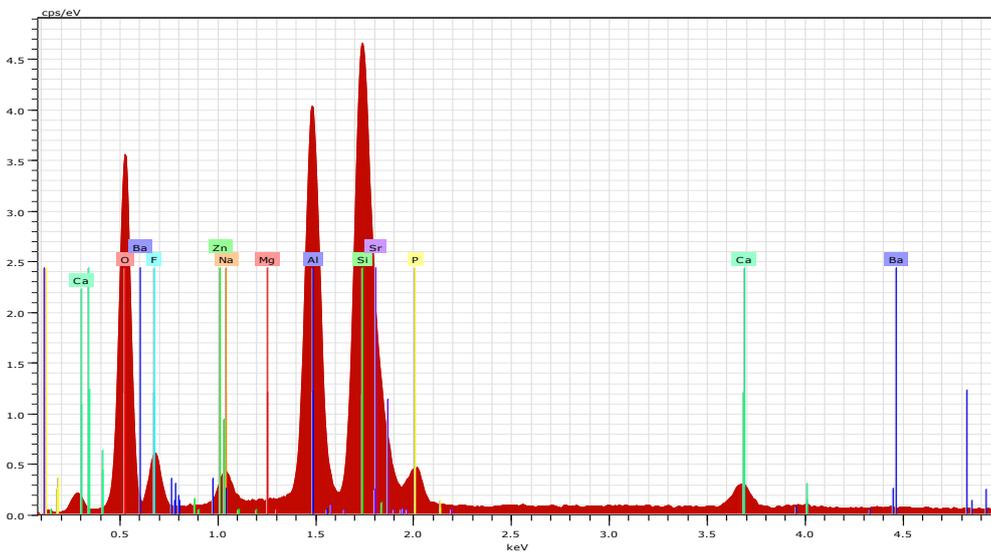


Рис. 4. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «ProGlass Nine»

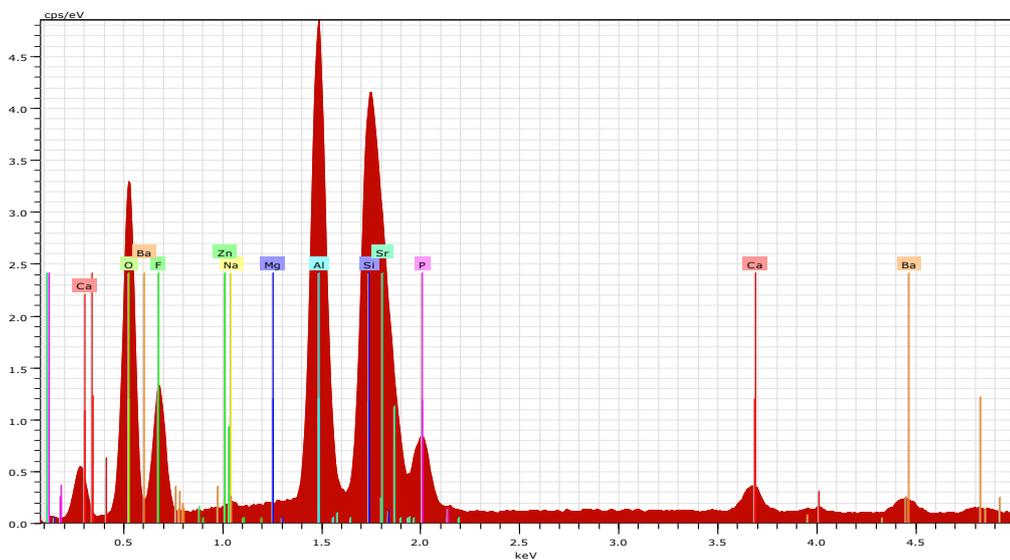


Рис. 5. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «Полиакрилин»

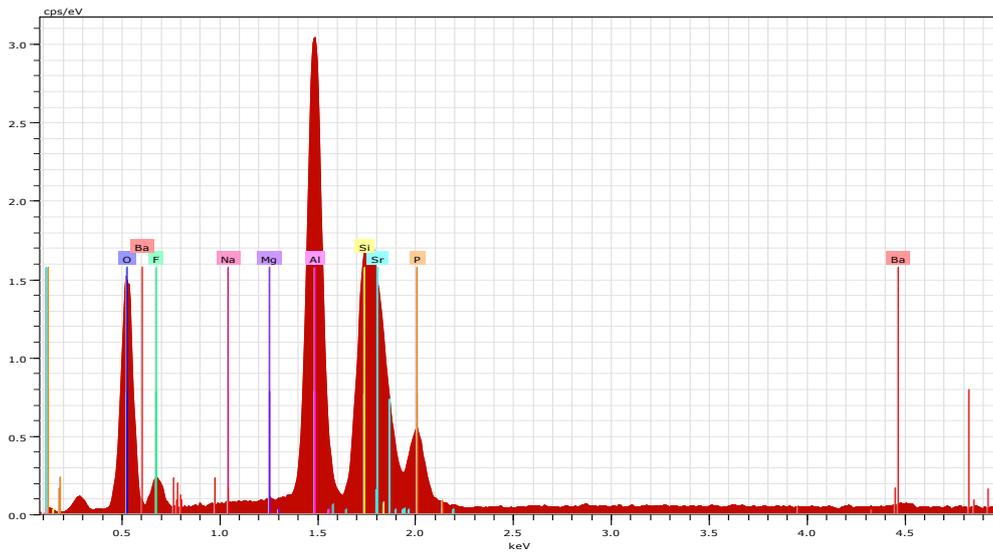


Рис. 6. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «Демиион»

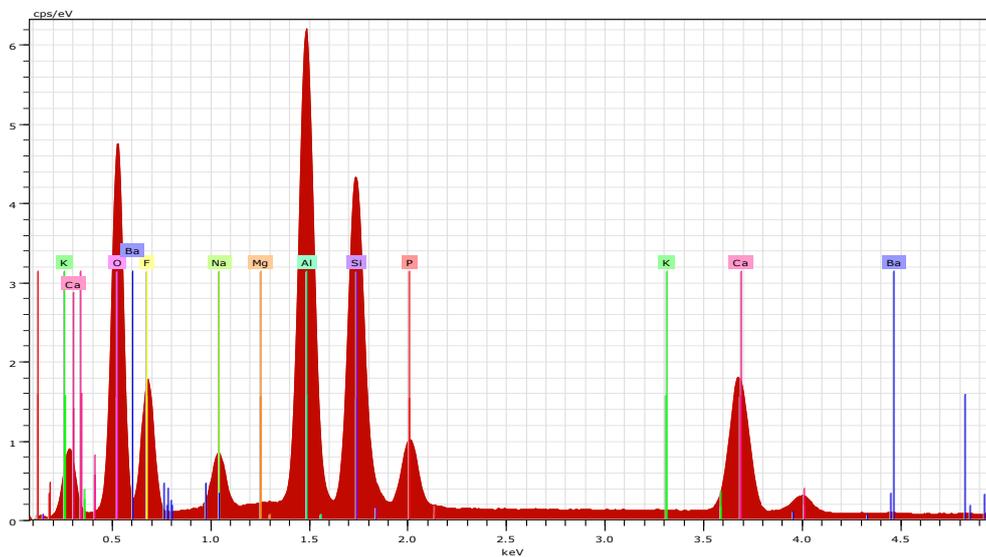


Рис. 7. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «Кемфил»

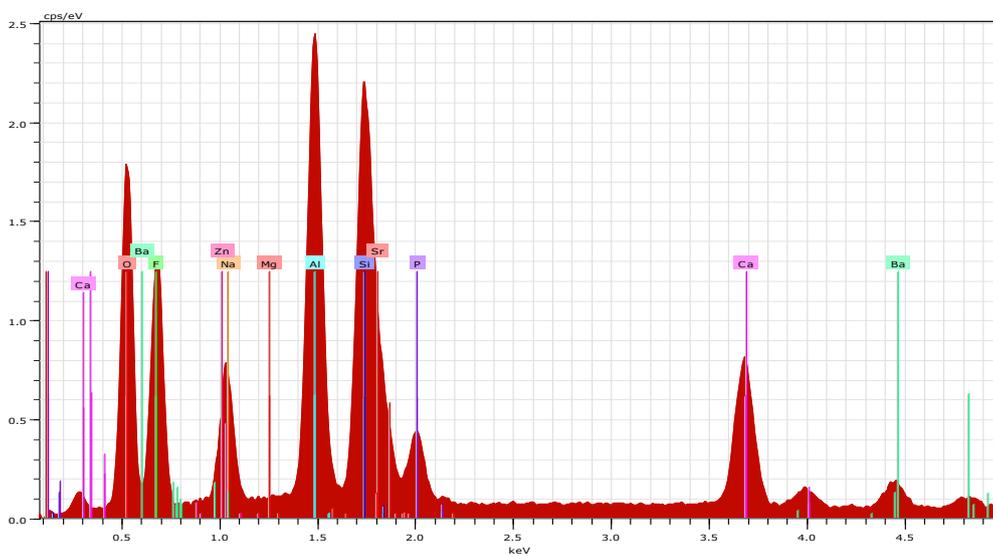


Рис. 8. Фрагмент энергодисперсионного спектра СИЦ «Глассин Рест»

Микроструктура порошков СИЦ представлена на рисунках 9–16. По данным СЭМ они представляют собой порошки, содержащие оскольчатые частицы, поверхность которых плотная, непористая. Конгломераты обнаружены в

«Ketac Molar Easymix», как показано на рисунке 10, что объясняется тем, что при его изготовлении проводится гранулирование порошка для улучшения его смачиваемости и упрощения замешивания [15].

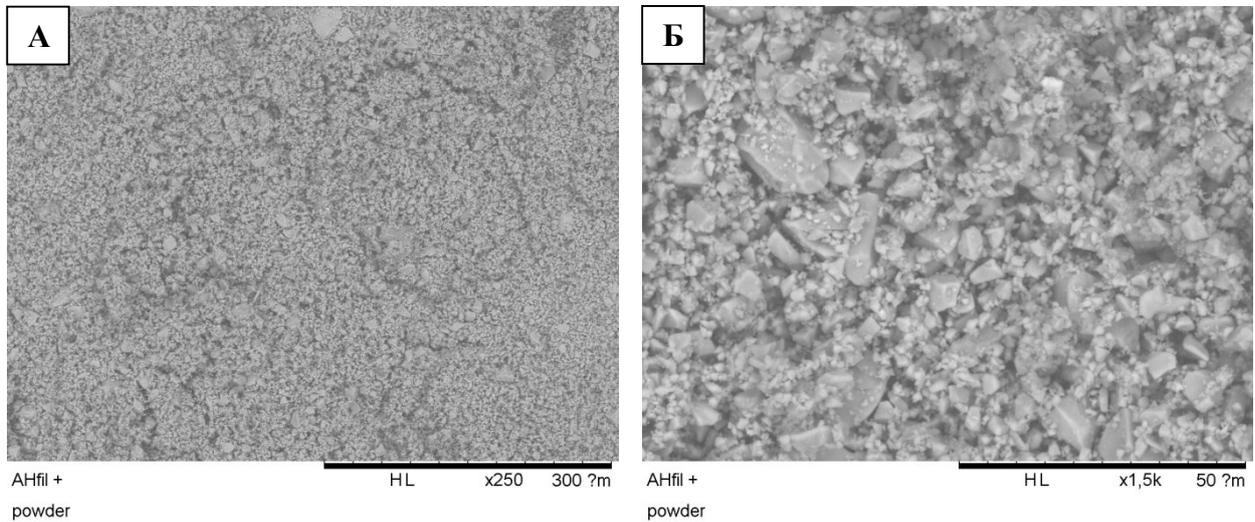


Рис. 9. Микроструктура порошка «AHfil +» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

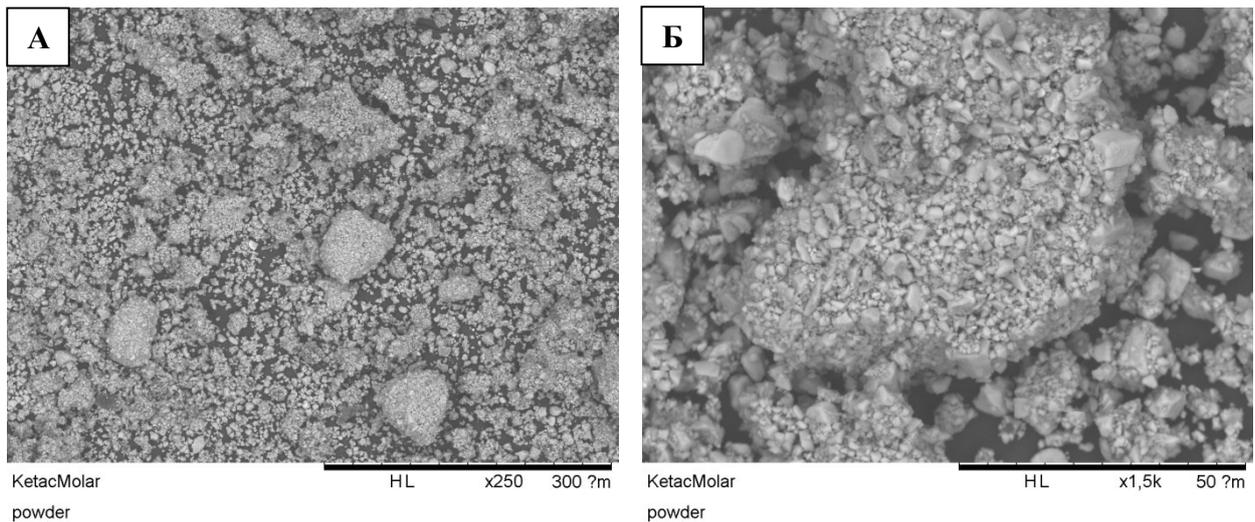


Рис. 10. Микроструктура порошка «Ketac Molar Easymix» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

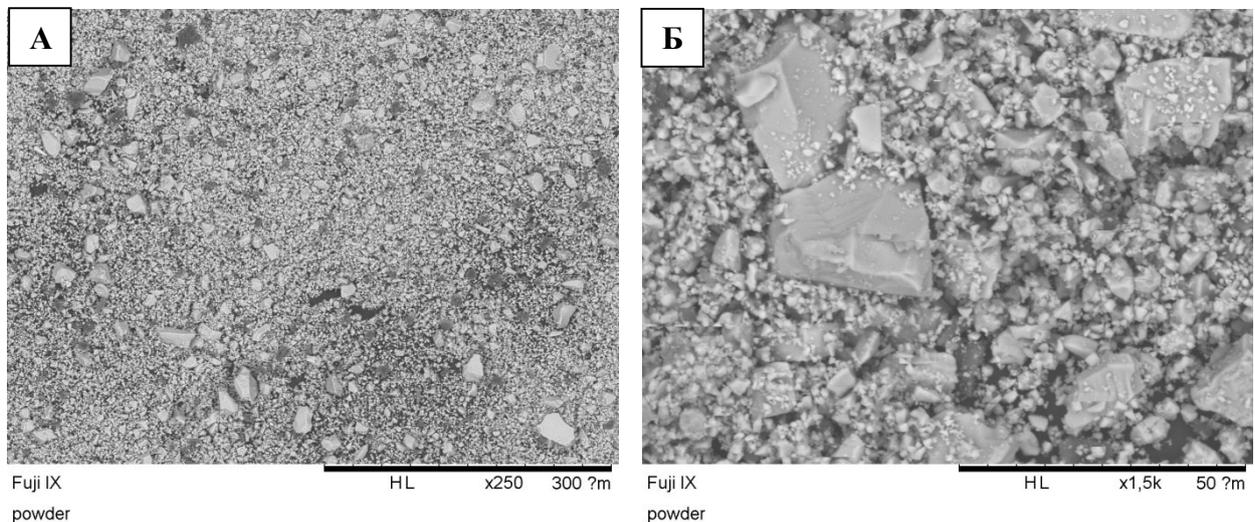


Рис. 11. Микроструктура порошка «Fuji IX GP» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

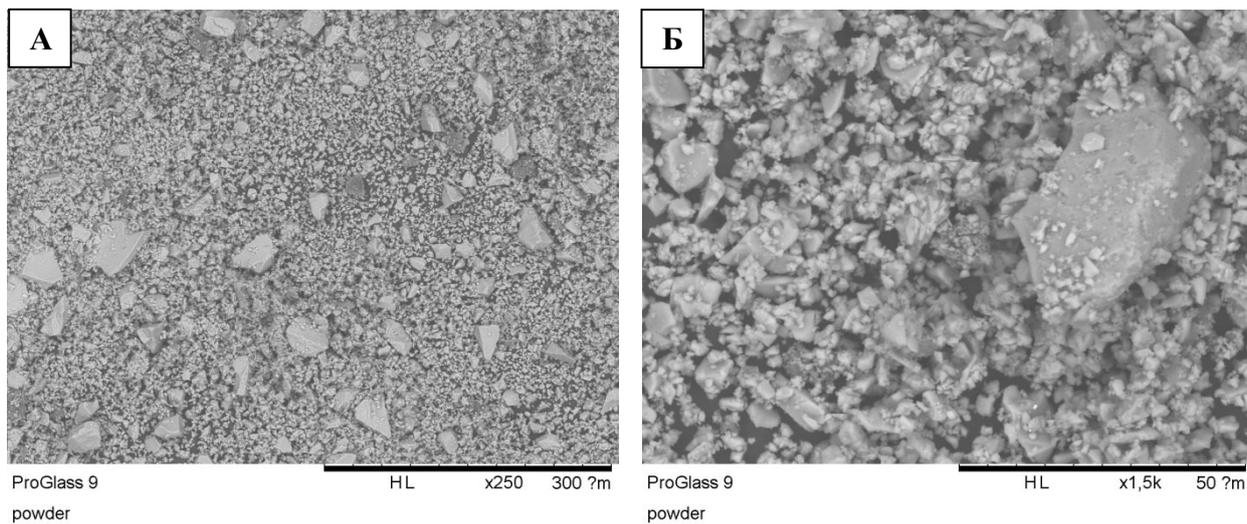


Рис. 12. Микроструктура порошка «ProGlass Nine» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

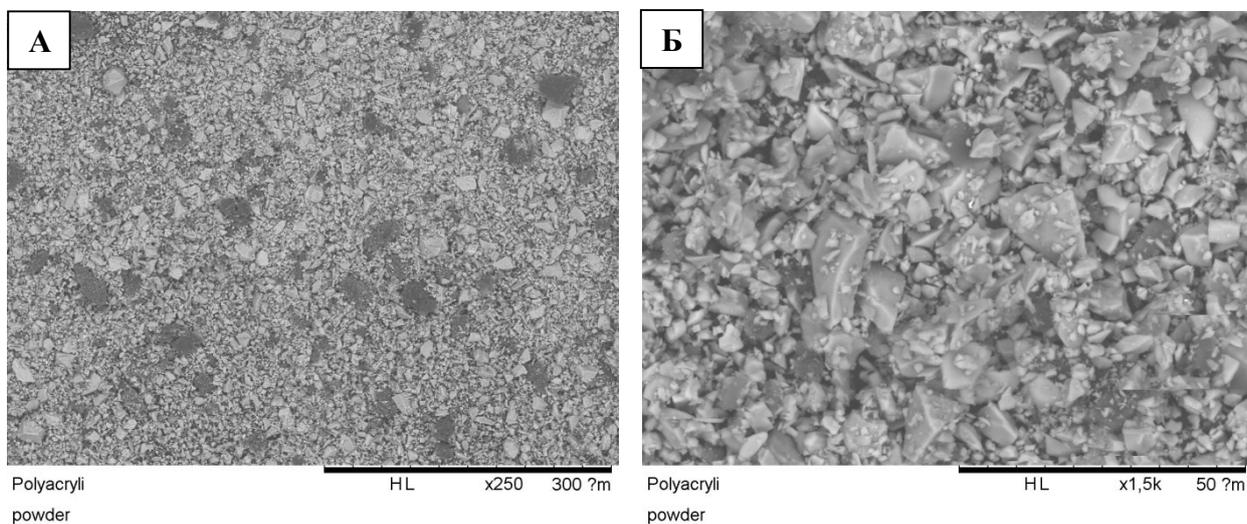


Рис. 13. Микроструктура порошка «Полиакрилин» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

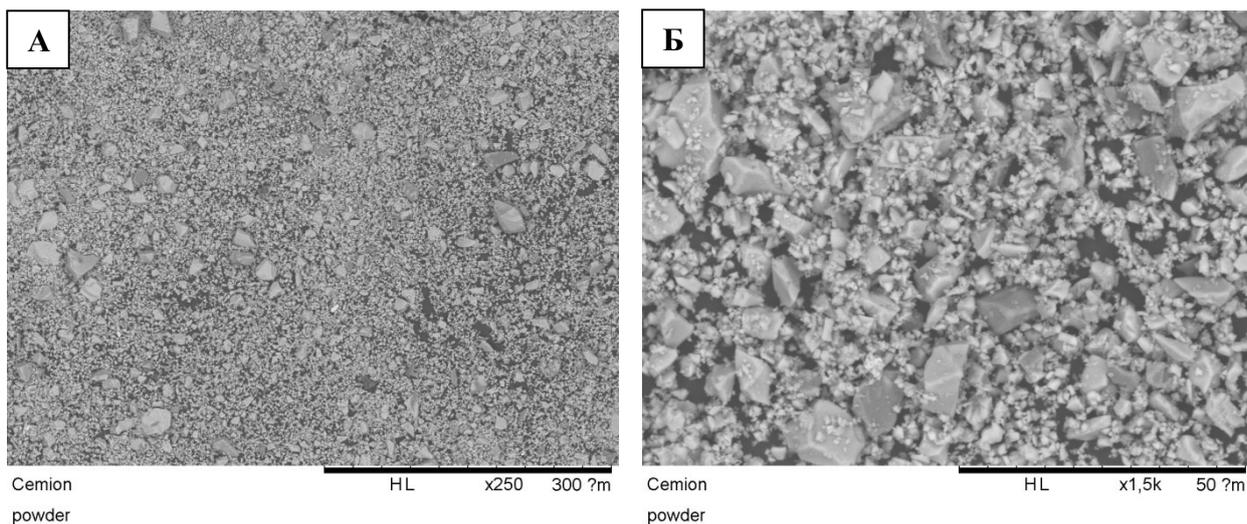


Рис. 14. Микроструктура порошка «Цемион» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

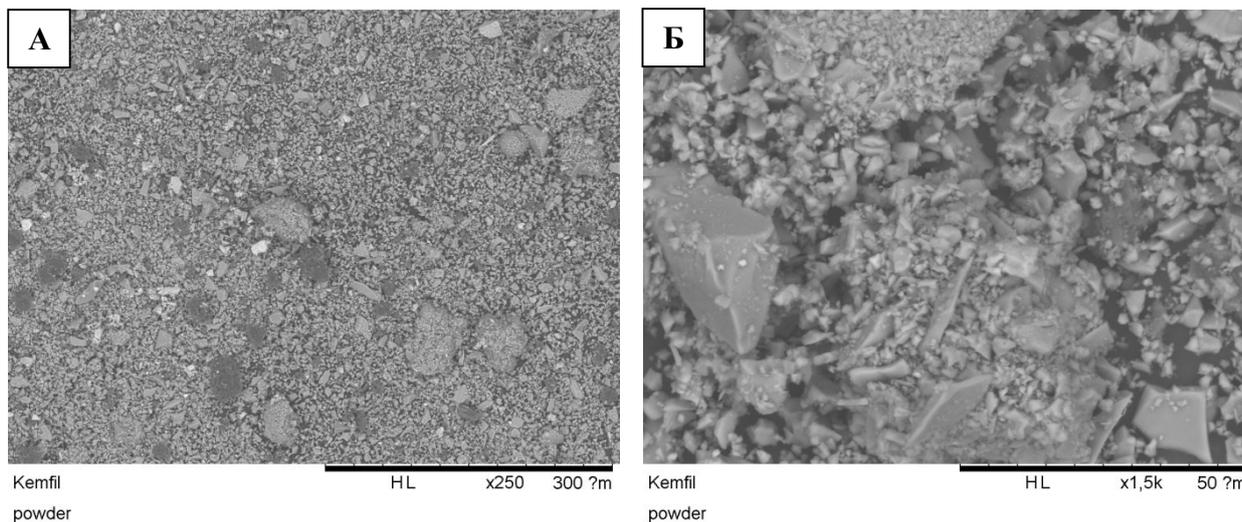


Рис. 15. Микроструктура порошка «Кемфил» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

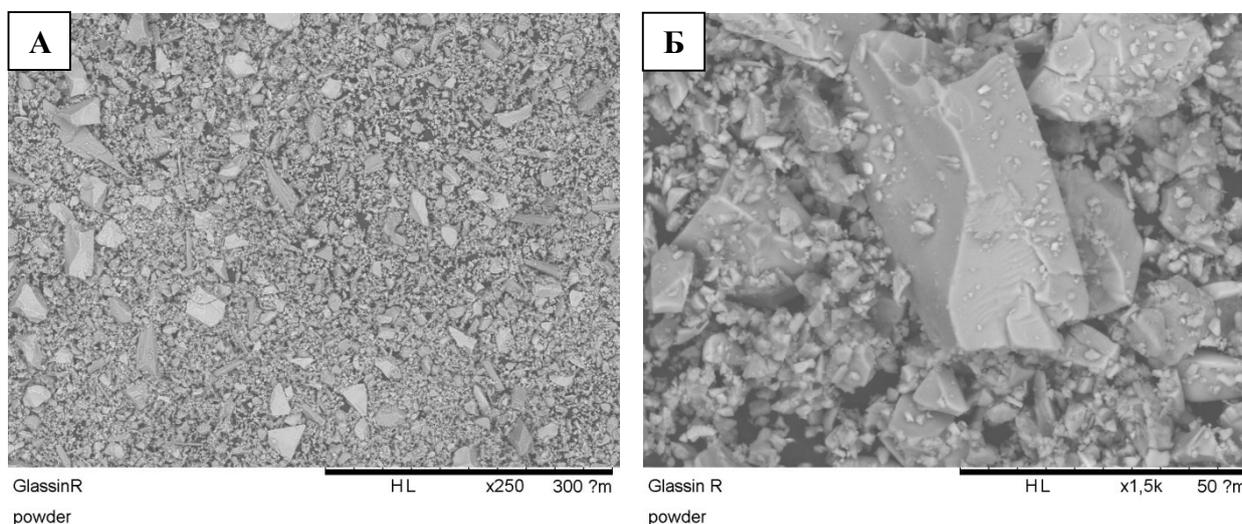


Рис. 16. Микроструктура порошка «Глассин Рест» при увеличении в 250 раз (А) и в 1500 раз (Б)

Результаты гранулометрического анализа представлены в таблице 2, а дифференциальные кривые распределения частиц по размерам – на рисунках 17–24.

«Цемион» и «Ketac Molar Easymix» характеризуются наибольшим содержанием мелких частиц (менее 1 мкм), 10 % их объема занимают частицы размером до 0,34 и 0,38 мкм соответственно. «Полиакрилин» и «Глассин Рест» не содержат частиц размером менее 1 мкм. «Ketac Molar Easymix» характеризуется наиболее мелким размером частиц. «Fuji IX GP» характеризуется наиболее широким бимодальным распределением частиц. Наибольшим средним размером частиц характеризуется «ProGlass Nine» (14,77 мкм). Наименьшим средним размером частиц характеризуется «Ketac Molar Easymix» (5,70 мкм). Полученные данные подтверждаются результатами сканирующей электронной микроскопии. Различия исследованных порошков СИЦ по гранулометрическому составу свидетельствуют о

различии в технологии помола стекла при их получении.

Результаты испытаний функциональных свойств СИЦ представлены в таблице 3. Порошок и жидкость СИЦ замешивали в соответствии с инструкциями изготовителей, однако «Кемфил» и «Глассин Рест» не удалось замешать при заявленном соотношении порошка и жидкости. Для данных СИЦ значения получены при снижении количества порошка в два раза.

Показано, что все исследованные СИЦ характеризуются достаточным рабочим временем. СИЦ «Ketac Molar Easymix» характеризуется наименьшим рабочим временем, которое составляет 1,0 минуту. Рабочее время остальных исследованных СИЦ является более подходящим для их клинического применения и составляет от 2 до 3,5 минут. По времени твердения все СИЦ, за исключением «ProGlass Nine», соответствуют требованиям ГОСТ 31578-2012 и ISO 9917-1:2007 (не более 6 минут). Кроме того, данный СИЦ

имеет наименьшую прочность среди исследованных (36 ± 3 МПа), что не соответствует требованиям ГОСТ 31578-2012 и ISO 9917-1:2007 (не менее 130 МПа). Также не соответствует требованиям нормативной документации по прочности

«Кемфил» и «Глассин Рест». По результатам испытаний «Fuji IX GP» имеет самую высокую прочность (201 ± 33 МПа). Прочность при сжатии остальных СИЦ соответствует нормативным требованиям и составляет 142-169 МПа.

Таблица 2

Гранулометрический состав порошков СИЦ

Критерий оценки частиц	Значение, мкм							
	АНfil +	Ketac Molar Easymix	Fuji IX GP	ProGlass Nine	Полиакрилин	Цемион	Кемфил	Глассин Рест
Среднее значение (Mean)	8,86	5,70	10,15	14,77	8,42	6,38	7,23	11,25
Стандартное отклонение (S.D.)	9,97	8,88	11,40	13,88	6,07	7,60	7,05	9,06
*D10	1,38	0,38	1,52	2,30	2,65	0,34	1,42	2,93
*D25	2,52	1,43	2,78	3,88	3,87	1,18	2,52	4,49
*D50	4,85	3,33	6,04	9,33	6,62	3,37	4,63	8,37
*D75	11,87	6,05	14,15	22,16	11,37	8,61	9,99	15,41
*D90	22,27	13,21	23,29	36,55	16,64	17,74	16,59	23,68

*D10, D25, D50, D75, D90 – частицы меньше указанного размера занимают 10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 % по объему соответственно.

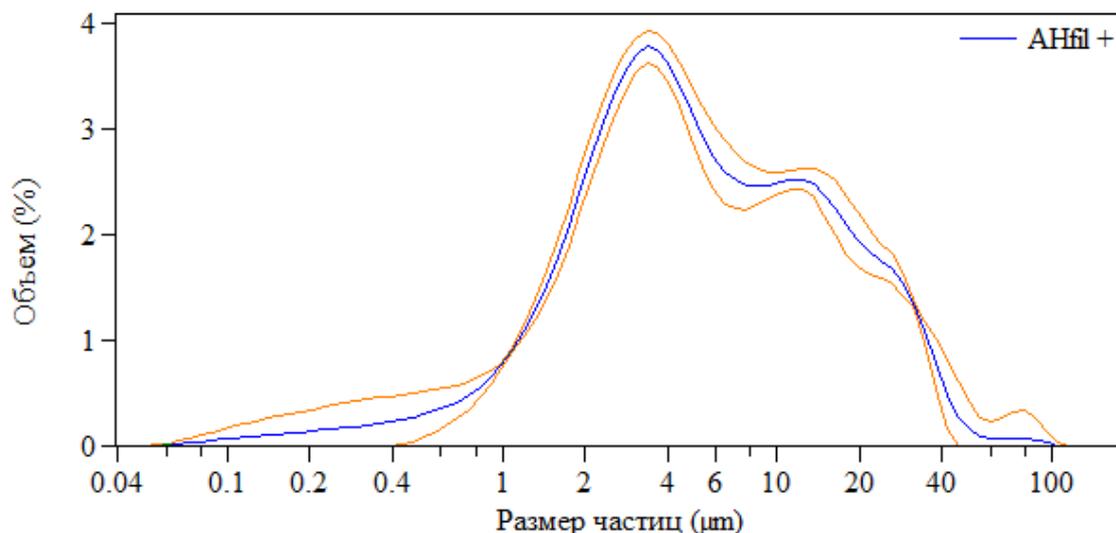


Рис. 17. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «АНfil +» по размерам

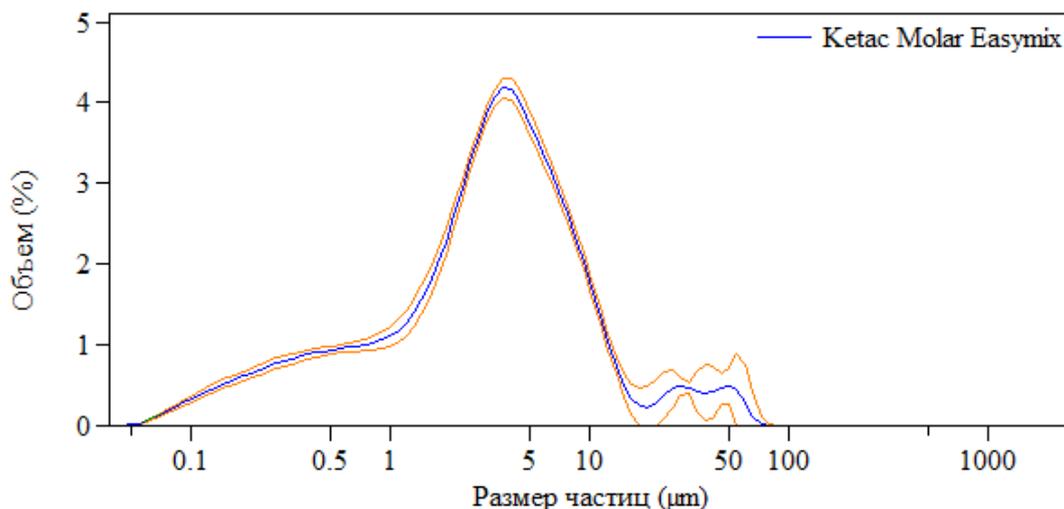


Рис. 18. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «Ketac Molar Easymix» по размерам

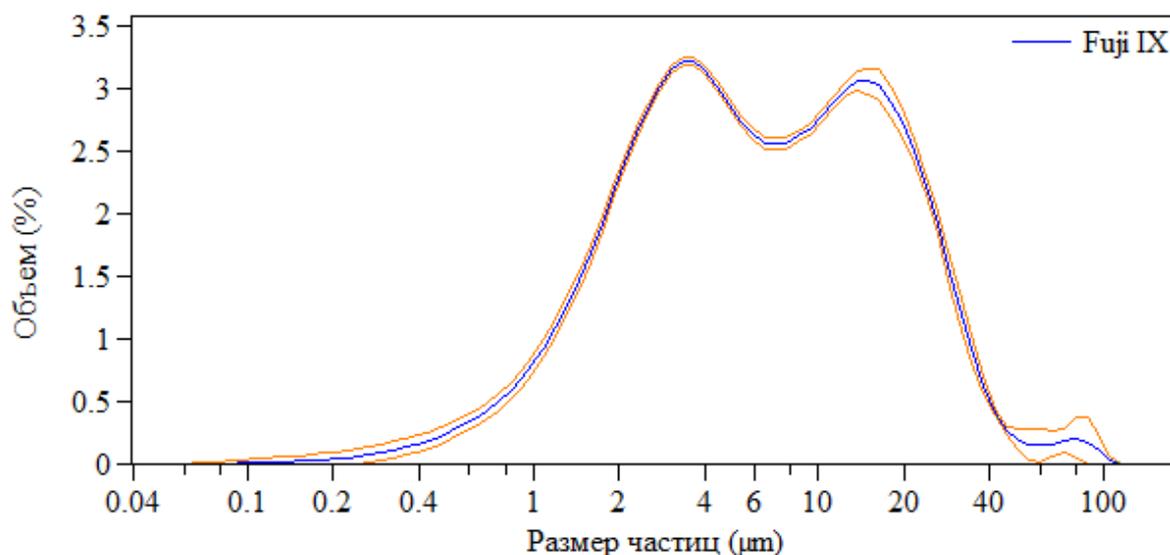


Рис. 19. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «Fuji IX GP» по размерам

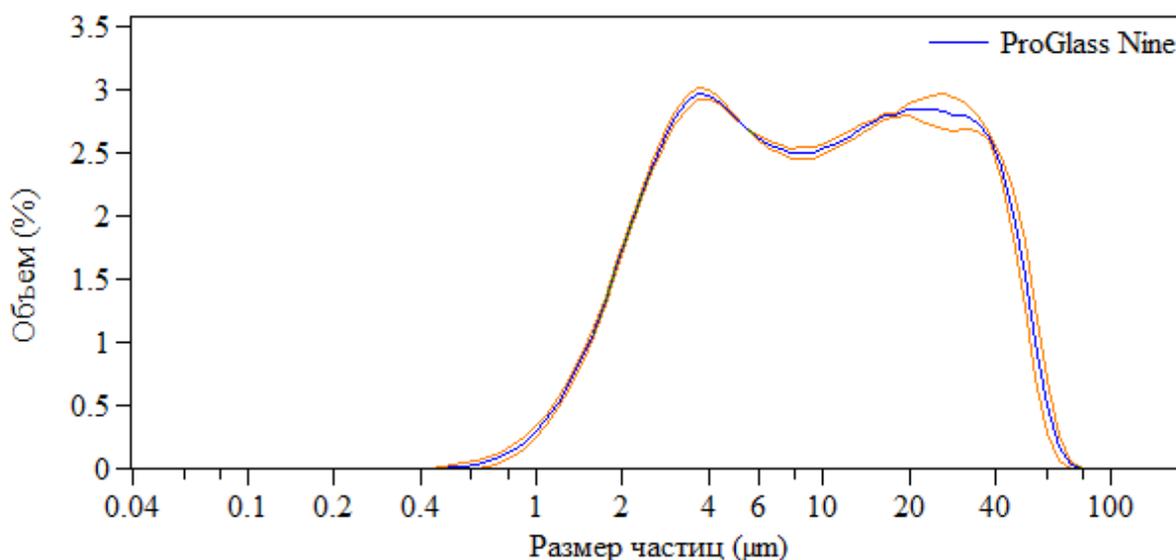


Рис. 20. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «ProGlass Nine» по размерам

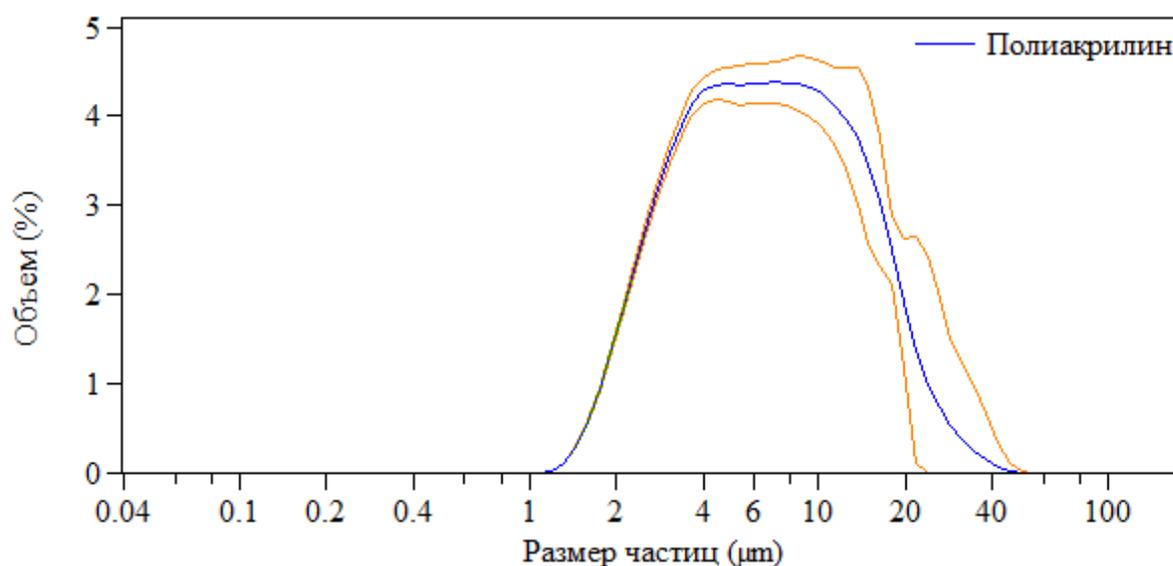


Рис. 21. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «Полиакрилин» по размерам

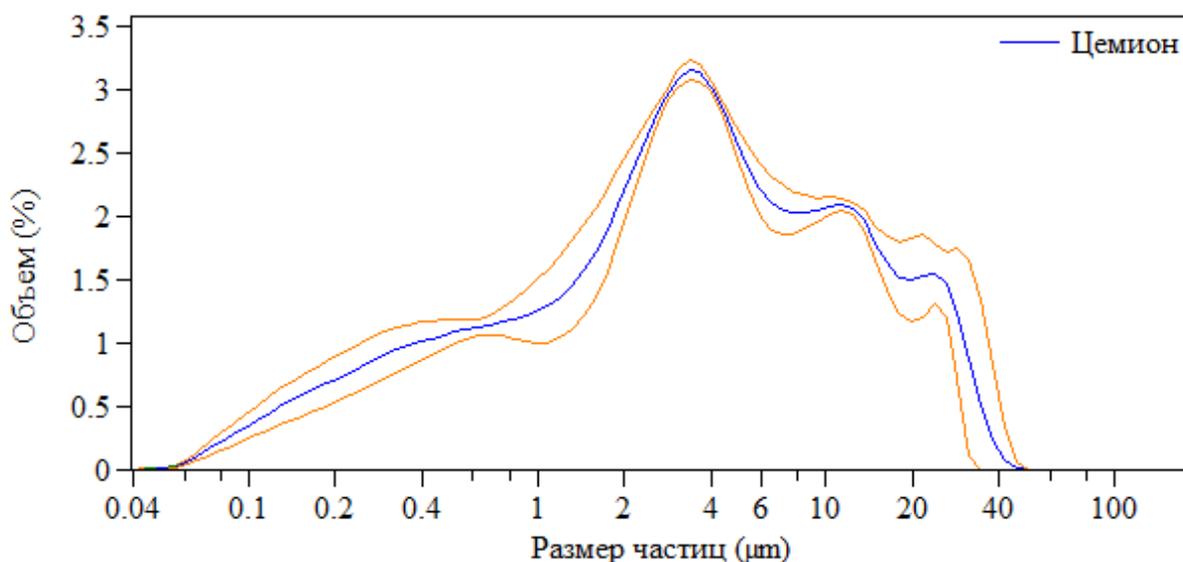


Рис. 22. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «Цемион» по размерам

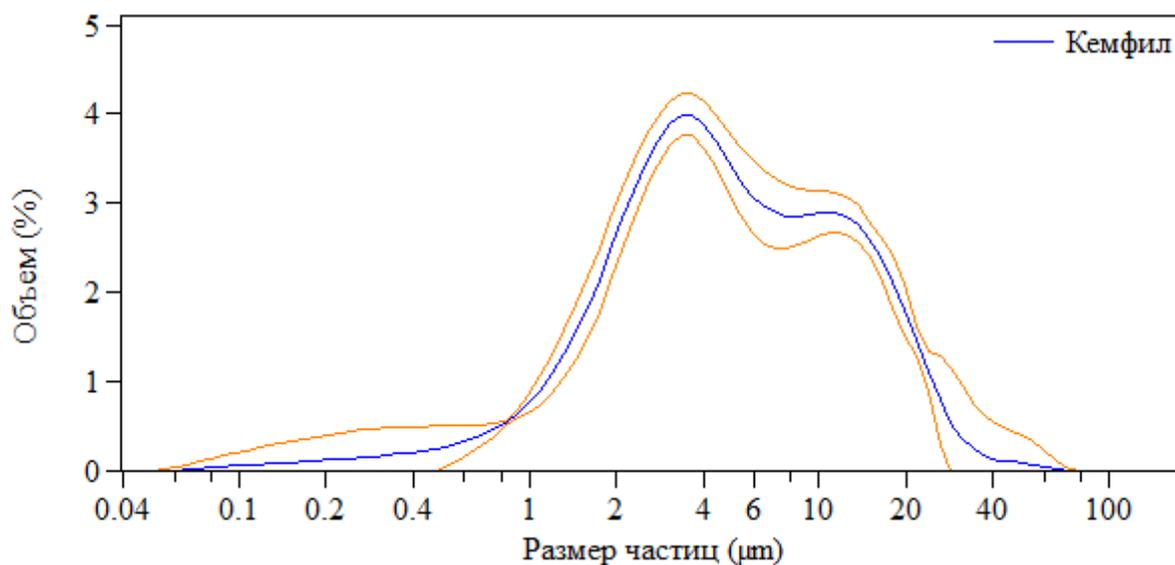


Рис. 23. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «Кемфил» по размерам

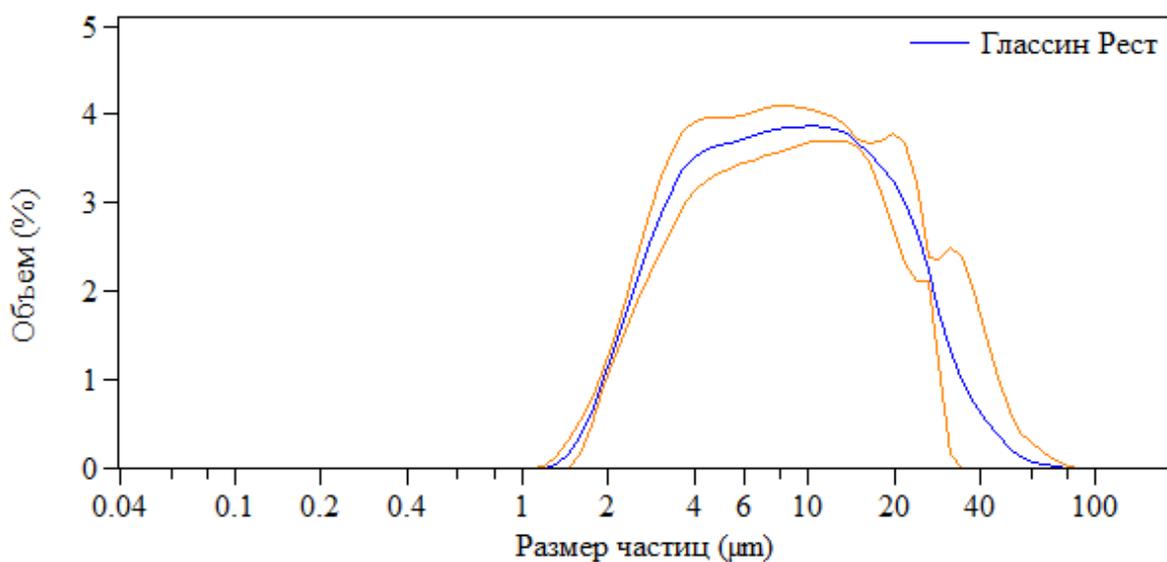


Рис. 24. Дифференциальная кривая распределения частиц СИЦ «Глассин Рест» по размерам

На рисунках 25–32 представлены рентгеновские снимки, на которых слева расположен образец испытуемого цемента, а справа – алюминиевый ступенчатый клин (толщина ступеней увеличивается от 1 до 4 мм сверху вниз). По результатам испытания показано, что все исследованные

СИЦ, за исключением нерентгеноконтрастного «ProGlass Nine», обладают рентгеноконтрастностью, соответствующей 1 степени алюминиевого клина (1 мм алюминия).

Таблица 3

Функциональные свойства СИЦ

	АНfil +	Ketac Molar Easymix	Fuji IX GP	ProGlass Nine	Полиакрилин	Цемион	Кемфил	Глассин Рест
Рабочее время, мин:сек	2:30	1:00	2:30	3:30	2:00	2:40	– (4:00*)	– (1:50*)
Время твердения, мин	3,5	4,0	4,0	11,0	4,5	4,5	– (5,0*)	– (4,0*)
Прочность при сжатии, МПа	169±6	158±5	201±33	36±3	150±7	142±6	– (68±6*)	– (104±5*)

*значения получены при снижении количества порошка в два раза.

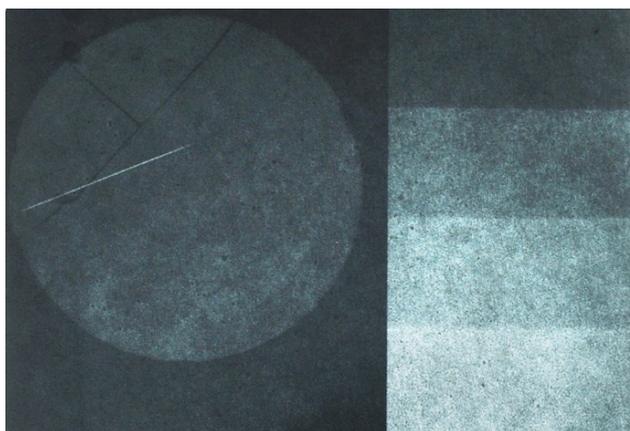


Рис. 25. Рентгеновский снимок СИЦ «АНfil +» и алюминиевого ступенчатого клина

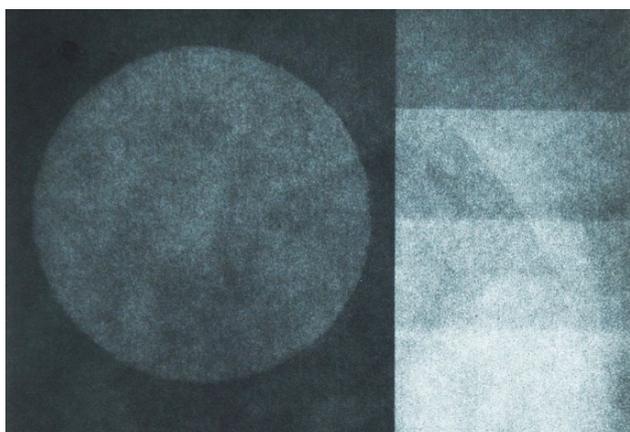


Рис. 26. Рентгеновский снимок СИЦ «Ketac Molar Easymix» и алюминиевого ступенчатого клина

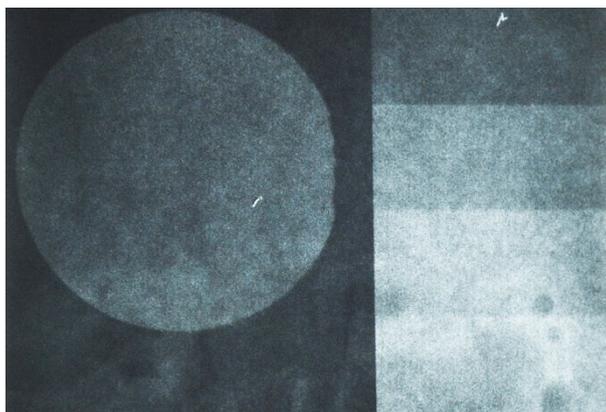


Рис. 27. Рентгеновский снимок СИЦ «Fuji IX GP» и алюминиевого ступенчатого клина

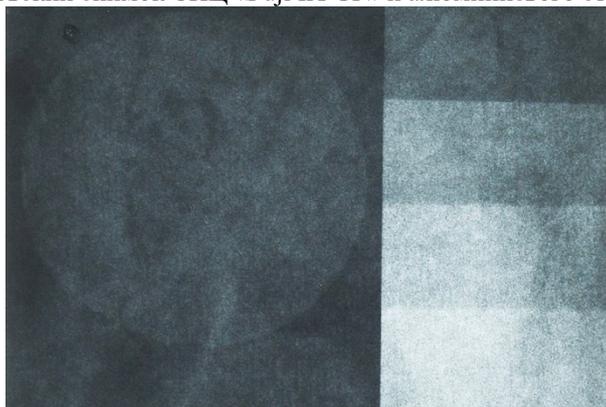


Рис. 28. Рентгеновский снимок СИЦ «ProGlass Nine» и алюминиевого ступенчатого клина

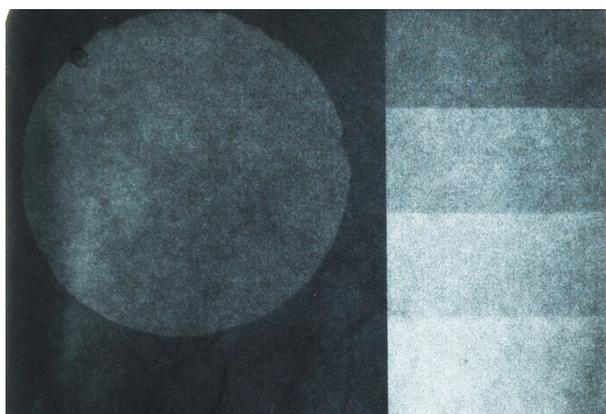


Рис. 29. Рентгеновский снимок СИЦ «Полиакрилин» и алюминиевого ступенчатого клина

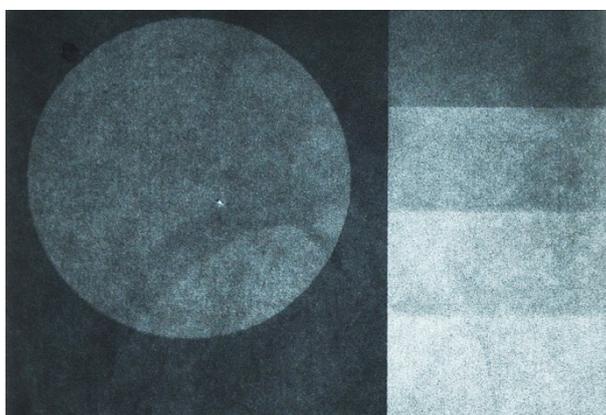


Рис. 30. Рентгеновский снимок СИЦ «Цемион» и алюминиевого ступенчатого клина

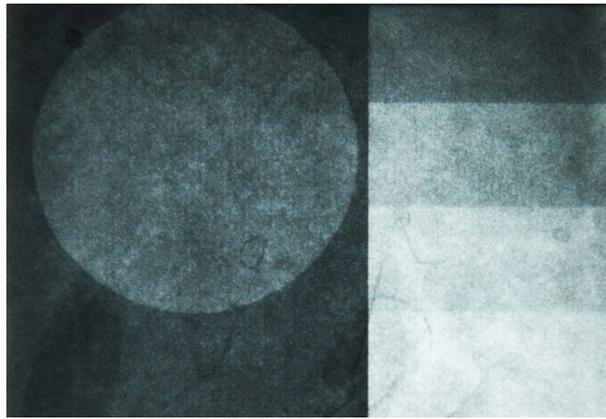


Рис. 31. Рентгеновский снимок СИЦ «Кемфил» и алюминиевого ступенчатого клина

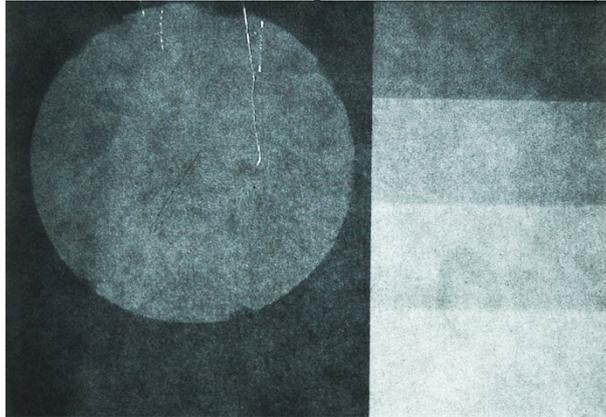


Рис. 32. Рентгеновский снимок СИЦ «Глассин Рест» и алюминиевого ступенчатого клина

По данным СЭМ при увеличении в 30 и 500 раз исследованные СИЦ после отверждения представляют собой стеклянные частицы различного размера, окруженные силикагелем и расположенные в матрице из поперечно связанных

молекул поликислот. Все исследованные образцы имеют дефекты структуры: трещины и поры.

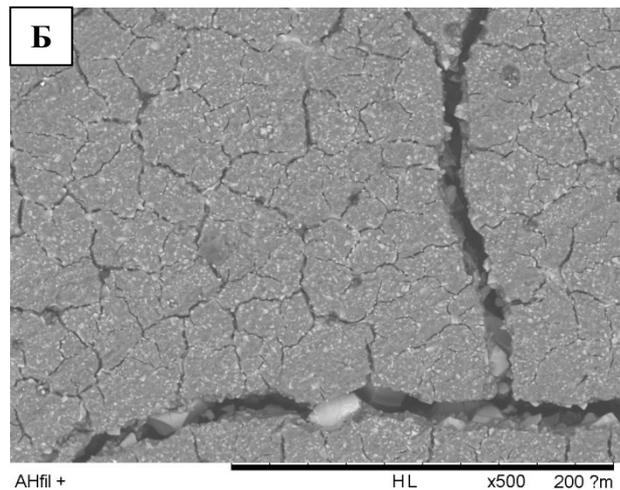
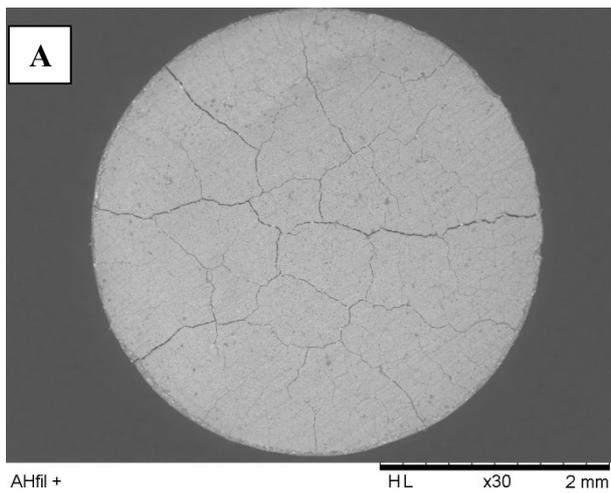


Рис. 33. Микроструктура «ANfil +» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

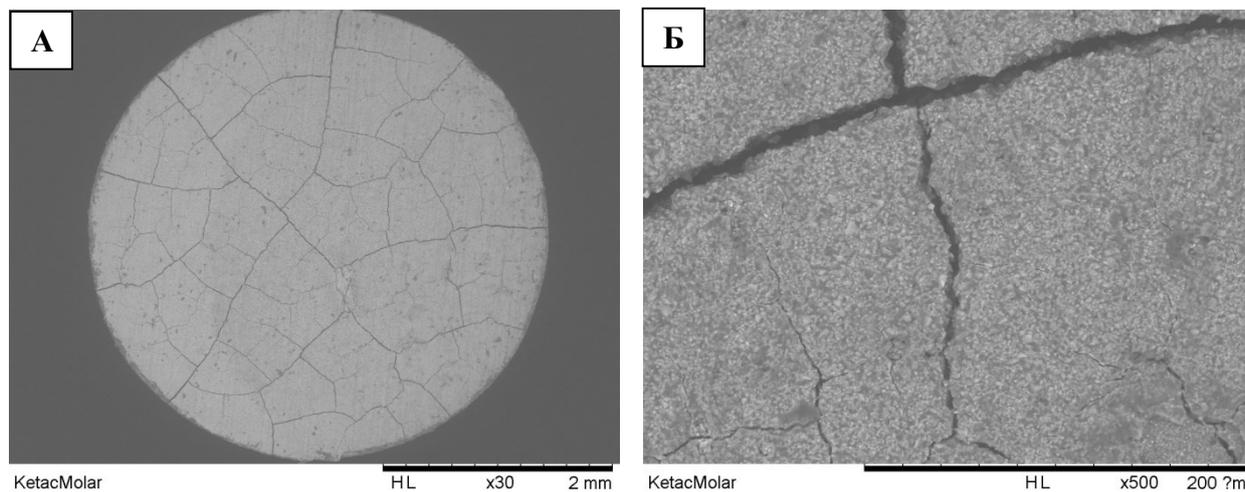


Рис. 34. Микроструктура «Ketac Molar EasyMix» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

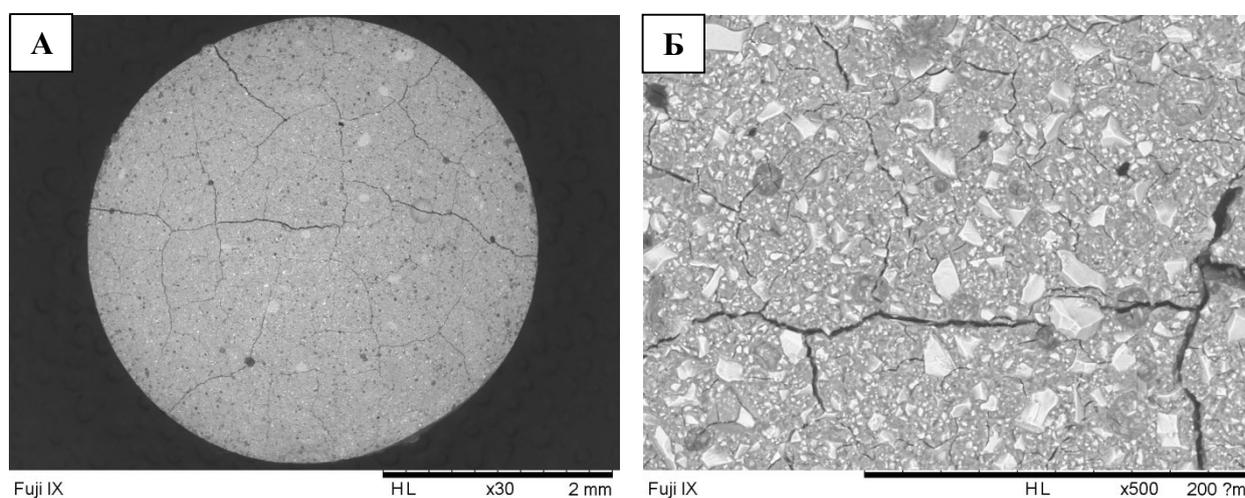


Рис. 35. Микроструктура «Fuji IX GP» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

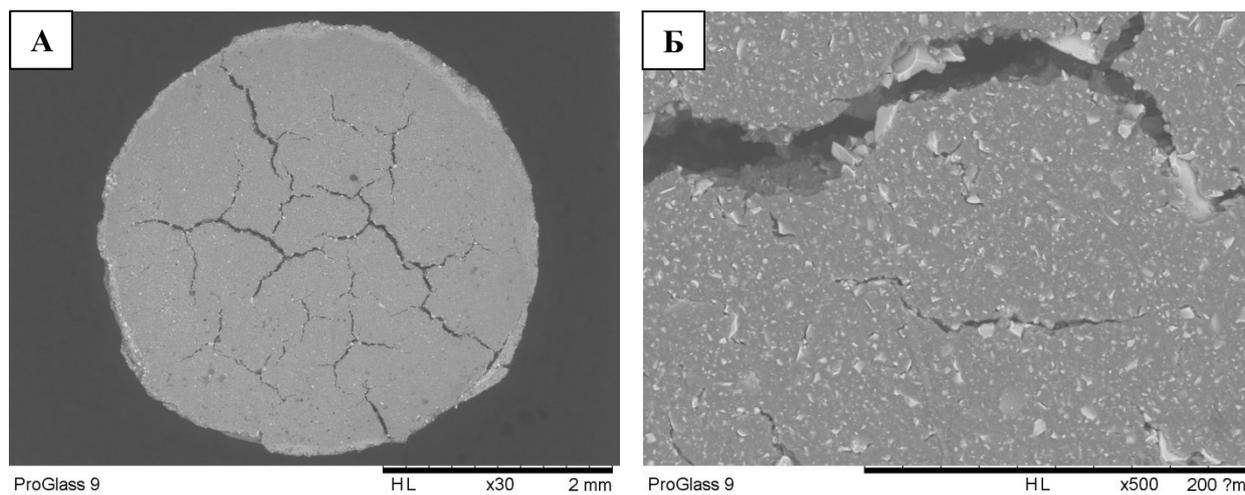


Рис. 36. Микроструктура «ProGlass Nine» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

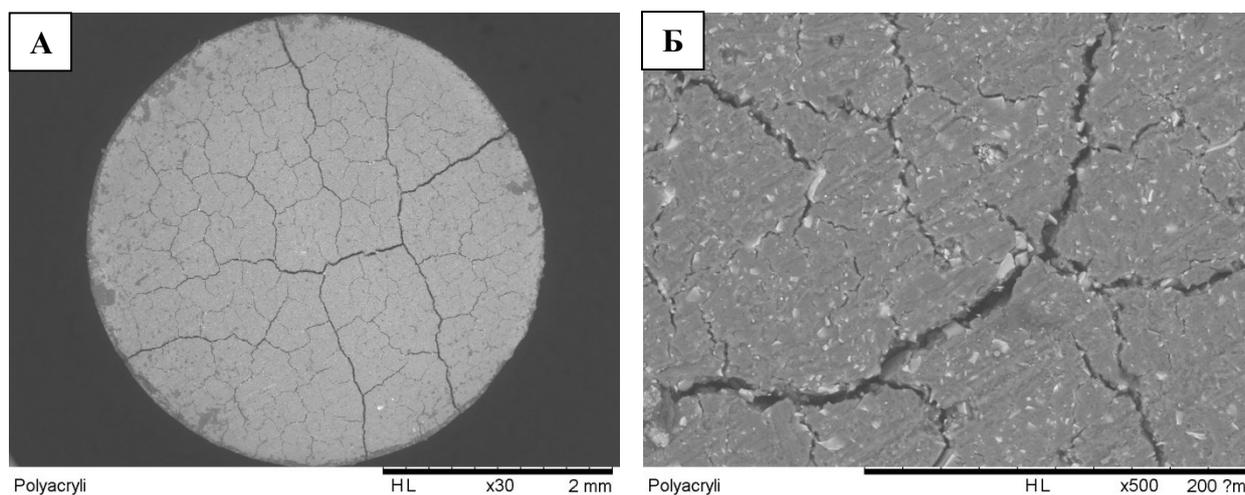


Рис. 37. Микроструктура «Полиакрилин» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

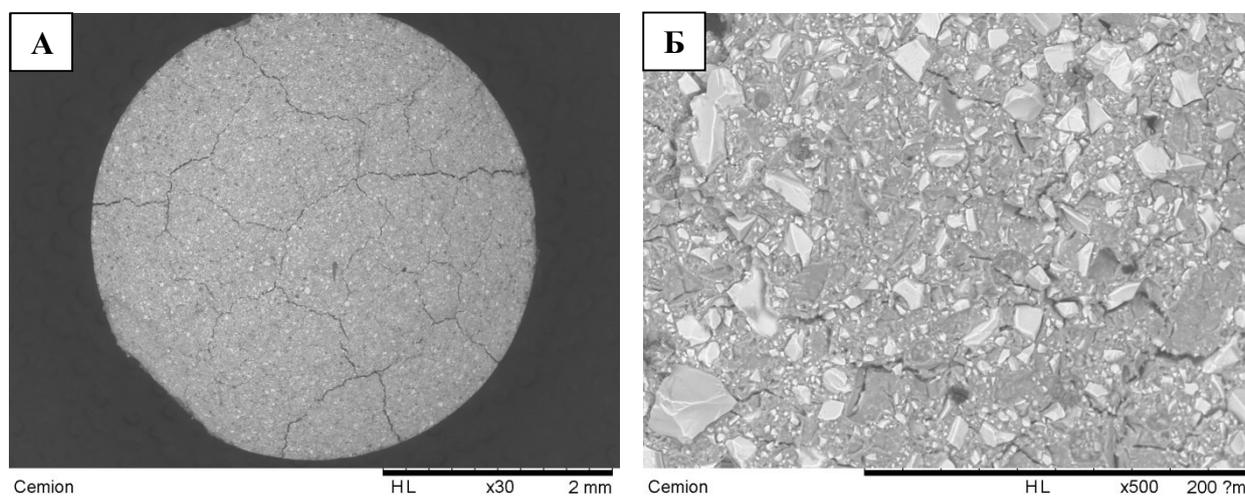


Рис. 38. Микроструктура «Цемион» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

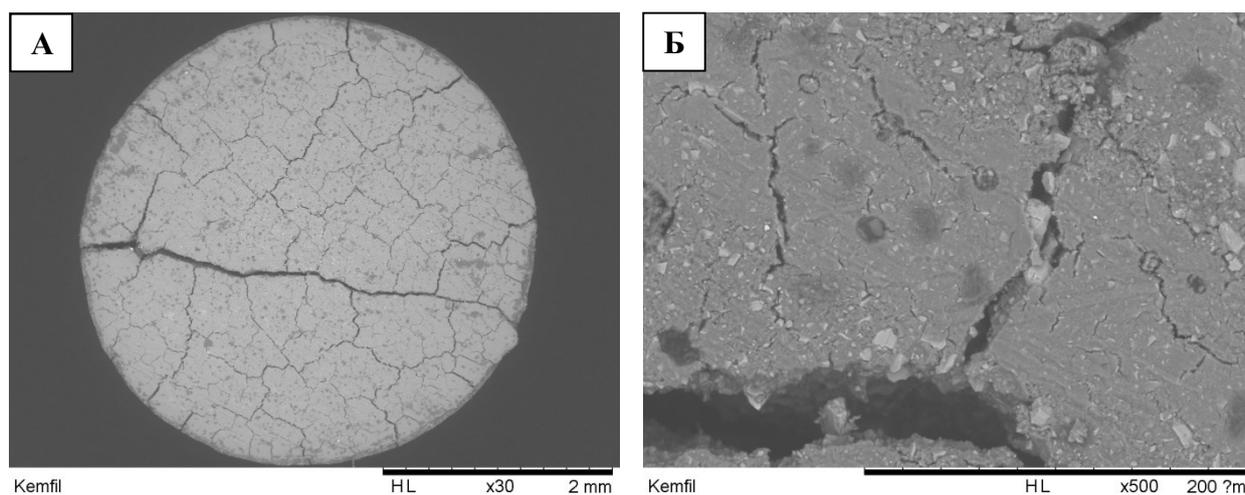


Рис. 39. Микроструктура «Кемфил» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

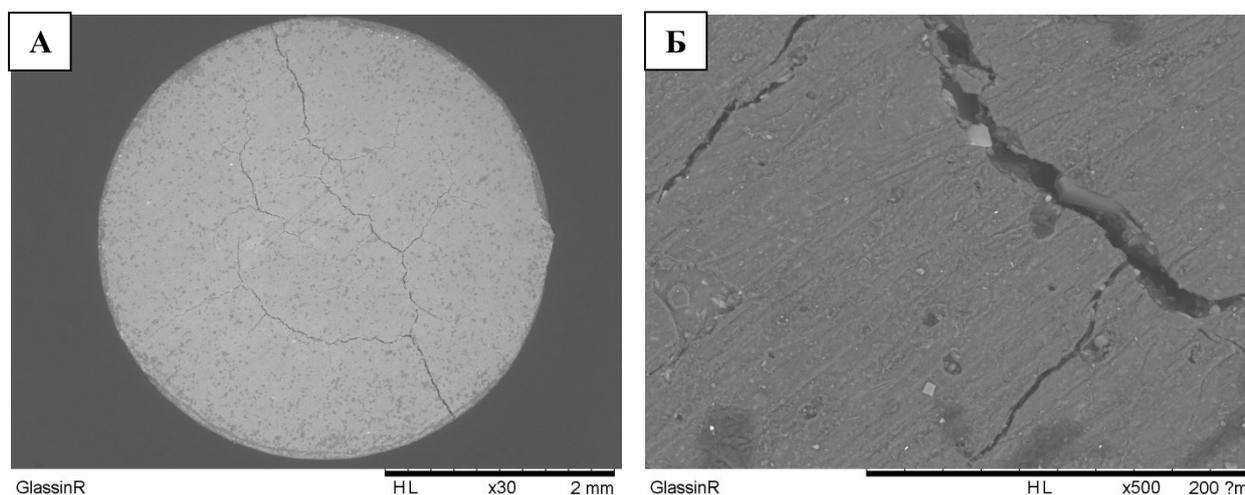


Рис. 40. Микроструктура «Глассин Рест» при увеличении в 30 раз (А) и в 500 раз (Б)

Выводы. По данным СЭМ порошки СИЦ содержат оскольчатые частицы, поверхность которых плотная, непористая. Наличие конгломератов в «Ketac Molar Easymix» объясняется тем, что при его изготовлении проводится гранулирование порошка для улучшения его смачиваемости и упрощения замешивания.

По результатам химического анализа порошков СИЦ методом энергодисперсионной спектроскопии для всех образцов СИЦ выявлены пики наибольшей интенсивности, соответствующие следующим химическим элементам: Si, Al и O, а также менее интенсивные пики обнаружены для элементов F и P. На основании того, что для «АНfil +», «Цемион» и «Fuji IX GP» выявлен пик Sr, можно сделать вывод о том, что данные СИЦ изготовлены из стеклонеполнителей на основе стронций-алюмо-фтор-силикатных стекол. На основе стеклонеполнителя из кальций-алюмо-фтор-силикатного стекла изготовлен «Кемфил», имеющий пик, соответствующий Ca. Для «ProGlass Nine», «Полиакрилин» и «Глассин Рест» выявлены пики, соответствующие Sr и Ca. Для «Ketac Molar Easymix» выявлены пики, соответствующие Ca и La. В соответствии с инструкцией по применению «Глассин Рест» должен содержать лантан, однако пика, соответствующего лантану, для данного СИЦ не выявлено. Помимо базовых элементов все исследованные СИЦ содержат от 0,15 до 4,26 % натрия, от 0,13 до 3,84 % бария, от 0,10 до 0,22 % магния, а также от 1,76 до 5,29 % фосфора. Содержание фтора в них составляет 6,25–20,71 %, при этом наименьшим характеризуется «Цемион», а наибольшим – «Глассин Рест».

Порошки «Цемион» и «Ketac Molar Easymix» характеризуются наибольшим содержанием мелких частиц (менее 1 мкм), 10 % их

объема занимают частицы размером до 0,34 и 0,38 мкм соответственно. «Полиакрилин» и «Глассин Рест» не содержат частиц размером менее 1 мкм. «Ketac Molar Easymix» характеризуется наиболее мелким размером частиц. «Fuji IX GP» характеризуется наиболее широким бимодальным распределением частиц. Наибольшим средним размером частиц характеризуется «ProGlass Nine» (14,77 мкм). Наименьшим средним размером частиц характеризуется «Ketac Molar Easymix» (5,70 мкм). Различия исследованных порошков СИЦ по гранулометрическому составу свидетельствуют о различии в технологии помола стекла при их получении.

По результатам испытаний функциональных свойств показано, что все исследованные СИЦ характеризуются достаточным рабочим временем, при этом наименьшим – «Ketac Molar Easymix» (1 минута). Рабочее время остальных исследованных СИЦ является более подходящим для их клинического применения и составляет от 2 до 3,5 минут. По времени твердения все СИЦ, за исключением «ProGlass Nine», соответствуют требованиям ГОСТ 31578-2012 и ISO 9917-1:2007 (не более 6 минут). Кроме того, данный СИЦ имеет наименьшую прочность среди исследованных (36 ± 3 МПа), что не соответствует требованиям ГОСТ 31578-2012 и ISO 9917-1:2007 (не менее 130 МПа). Также не соответствует требованиям нормативной документации по прочности «Кемфил» и «Глассин Рест». По результатам испытаний «Fuji IX GP» имеет самую высокую прочность (201 ± 33 МПа). Прочность при сжатии остальных СИЦ составляет 142–169 МПа.

По данным СЭМ СИЦ после отверждения представляют собой стеклянные частицы различ-

ного размера, окруженные силикагелем и расположенные в матрице из поперечно связанных молекул поликислот. Все исследованные образцы имеют дефекты структуры: трещины и поры.

По результатам испытания показано, что все исследованные СИЦ, за исключением нерентгеноконтрастного «ProGlass Nine», обладают рентгеноконтрастностью, соответствующей 1 ступени алюминиевого клина (1 мм алюминия).

По результатам испытаний среди исследованных СИЦ нами рекомендованы к применению в стоматологической практике «АНfil+», «Ketac Molar Easymix», «Fuji IX GP», «Полиакрилин» и «Цемион».

Источник финансирования. Проект Пр-7/22 в рамках реализации Программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2021-2030 гг. «Приоритет 2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Gurgan S., Kutuk Z.B., Ergin E., Oztas S.S., Cakir F.Y. Clinical performance of a glass ionomer restorative system: a 6-year evaluation // Clin Oral Investig. 2017. Vol. 21. No. 7. Pp. 2335–2343. DOI: 10.1007/s00784-016-2028-4.
- Manappallil J.J. Basic Dental Materials. II Edition. India: Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd, 2003. 446 p. DOI: 10.5005/jp/books/10075.
- Hassan M.M. Glass Ionomer Cements May Be Used as an Alternative to Composite Resins in Class II (CL II) Restoration of Primary Molars // J Evid Based Dent Pract. 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jebdp.2020.101437.
- Чистякова Г.Г. Стеклоиономерные цементы: учебное пособие. Минск: БГМУ, 2010. 28 с.
- Frencken J.E. The ART approach using glass-ionomers in relation to global oral health care // Dental Materials. 2010. Vol. 26. No. 1. Pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.dental.2009.08.013.
- Torres P.J., Phan H.T., Bojorquez A.K., Garcia-Godoy F., Pinzon L.M. Minimally Invasive Techniques Used for Caries Management in Dentistry. A Review // J Clin Pediatr Dent. 2021. Vol. 45. No. 4. Pp. 224–232. DOI: 10.17796/1053-4625-45.4.2.
- Heintze S.D., Loguercio A.D., Hanzen T.A., Reis A., Rousson V. Clinical efficacy of resin-based direct posterior restorations and glass-ionomer restorations - An updated meta-analysis of clinical outcome parameters // Dent Mater. 2022. Vol. 38. No. 5. Pp. e109-e135. DOI: 10.1016/j.dental.2021.10.018.
- Mustafa H.A., Soares A.P., Paris S., Elhennawy K., Zaslansky P. The forgotten merits of GIC restorations: a systematic review // Clin Oral Investig. 2020. Vol. 24. No. 7. Pp. 2189–2201. DOI: 10.1007/s00784-020-03334-0.
- Sharanbir K. Sidhu. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p. DOI: 10.1007/978-3-319-22626-2.
- Nicholson J. W. The Chemistry of Medical and Dental Materials. Edition 2. UK: Royal Society of Chemistry, 2020. 272 p. DOI:10.1039/9781788016360.
- Mount G.J. An Atlas of Glass-Ionomer Cements: A Clinician's Guide. London: Martin Dunitz, 2003. 224 p.
- Davidson C.L., Mjor I.A. Advances in Glass-Ionomer Cements. USA: Quintessence Publishing Co, 1999. 303 p.
- Braden M., Clarke R. L., Nicholson J., Parker S. Polymeric Dental Materials. Germany: Springer. 2012. 124 p. DOI: 10.1007/978-3-642-60537-6.
- Ричард ван Нурт. Основы стоматологического материаловедения. Edinburgh : Mosby; [M.] : КМК-Инвест, 2002. 304 с.
- Ketac™ Molar Easymix. Glass Ionomer Filling Material. Brochure. [Электронный ресурс]. URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/2734850/ketac-molar-easymix-brochure.pdf> (дата обращения 07.08.2022).

Информация об авторах

Романенко Анастасия Андреевна, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: neanas@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бузов Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, технический директор. E-mail: buzov@mail.ru. Опыт-но-экспериментальный завод «ВладМиВа». Россия, 308023, Белгород, ул. Студенческая, д.19.

Чув Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор. E-mail: chuev@vladmiva.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: dva_vajik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Онищук Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: tsk_bgту@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Фанина Евгения Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: evgenia@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.09.2022 г.

© Романенко А.А., Бузов А.А., Чуев В.П., Дороганов В.А., Онищук В.И., Фанина Е.А., 2022

¹Romanenko A.A., ²Buzov A.A., ^{1,2}Chuev V.P., ¹Doroganov V.A., ¹Onishchuk V.I., ¹Fanina E.A.

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

²VladMiVa Experimental Plant JSC

*E-mail: neanas@mail.ru

RESEARCH OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON ALUMINOFLUOROSILICATE GLASS

Abstract. The results of a comparative analysis of dental glass ionomer cements are compared: "AHfil +" (AHL, United Kingdom), "Ketac Molar Easymix" (3M ESPE, USA), "Fuji IX GP" (GC, Japan), "ProGlass Nine" (Silmet, Israel), "Polyacrylin" (TechnoDent, Russia), "Cemion" (VladMiVa, Russia), "Kemfil" (StomaDent, Russia) and "Glassin Rest" (Omega-Dent, Russia) in terms of working time, hardening time, strength compression, radiopacity, microstructure and chemical composition. It is shown that the main component of the powders of these GICs is crushed calcium ("Kemfil"), strontium ("AHfil +", "Cemion" and "Fuji IX GP"), calcium-strontium ("ProGlass Nine", "Polyacrylin" and "Glassin Rest") and lanthanum-calcium aluminofluorosilicate glass ("Ketac Molar Easymix"). All of them contain phosphorus. Differences in powder granulometric composition indicate a difference in the technology of glass grinding during their production. The working time of the studied GICs is from 1 to 3.5 minutes. The requirements of GOST 31578-2012 and ISO 9917-1:2007 do not correspond to "ProGlass Nine" (36 ± 3 MPa), "Kemfil" (68 ± 6 MPa) and "Glassin Rest" in terms of strength, and "ProGlass Nine" in hardening time. "Fuji IX GP" has the highest strength (201 ± 33 MPa), the rest of the GIC - 142-169 MPa. All studied GICs, with the exception of the non-radiopacity "ProGlass Nine", have a radiopacity corresponding to 1 mm of aluminum. According to the results of the tests, "AHfil +", "Ketac Molar Easymix", "Fuji IX GP", "Polyacrylin" and "Cemion" are recommended for clinical use by dentists.

Keywords: glass ionomer cement, aluminofluorosilicate glass, dental material, dentistry.

REFERENCES

1. Gurgan S., Kutuk Z.B., Ergin E., Oztas S.S., Cakir F.Y. Clinical performance of a glass ionomer restorative system: a 6-year evaluation. Clin Oral Investig. 2017. Vol. 21. No. 7. Pp. 2335–2343. DOI: 10.1007/s00784-016-2028-4.

2. Manappallil J.J. Basic Dental Materials. II Edition. India: Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd, 2003. 446 p. DOI: 10.5005/jp/books/10075.

3. Hassan M.M. Glass Ionomer Cements May Be Used as an Alternative to Composite Resins in Class II (CL II) Restoration of Primary Molars. J Evid Based Dent Pract. 2020. Vol. 20. No. 2. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.jebdp.2020.101437.

4. Chistyakova G.G. Glass ionomer cements: a tutorial (Stekloionomernye cementy: uchebnoe posobie). Minsk: BGMU. 2010, 28 p.

5. Frencken J.E. The ART approach using glass-ionomers in relation to global oral health care. Dental Materials. 2010. Vol. 26. No. 1. Pp. 1–6. DOI: 10.1016/j.dental.2009.08.013.

6. Torres P.J., Phan H.T., Bojorquez A.K., Garcia-Godoy F., Pinzon L.M. Minimally Invasive

Techniques Used for Caries Management in Dentistry. A Review. J Clin Pediatr Dent. 2021. Vol. 45. No. 4. Pp. 224–232. DOI: 10.17796/1053-4625-45.4.2.

7. Heintze S.D., Loguercio A.D., Hanzen T.A., Reis A., Rousson V. Clinical efficacy of resin-based direct posterior restorations and glass-ionomer restorations – An updated meta-analysis of clinical outcome parameters. Dent Mater. 2022. Vol. 38. No. 5. Pp. e109-e135. DOI: 10.1016/j.dental.2021.10.018.

8. Mustafa H.A., Soares A.P., Paris S., Elhennawy K., Zaslansky P. The forgotten merits of GIC restorations: a systematic review. Clin Oral Investig. 2020. Vol. 24. No. 7. Pp. 2189–2201. DOI: 10.1007/s00784-020-03334-0.

9. Sharanbir K. Sidhu. Glass-Ionomers in Dentistry. UK: Springer, 2016. 162 p. DOI: 10.1007/978-3-319-22626-2.

10. Nicholson J. W. The Chemistry of Medical and Dental Materials. Edition 2. UK: Royal Society of Chemistry, 2020. 272 p. DOI: 10.1039/9781788016360.

11. Mount G.J. An Atlas of Glass-Ionomer Cements: A Clinician's Guide. London: Martin Dunitz, 2003. 224 p.

12. Davidson C.L., Mjor I.A. Advances in Glass-Ionomer Cements. USA: Quintessence Publishing Co, 1999. 303 p.

13. Braden M., Clarke R. L., Nicholson J., Parker S. Polymeric Dental Materials. Germany: Springer. 2012. 124 p. DOI: 10.1007/978-3-642-60537-6.

14. Richard van Nurt. Fundamentals of Dental Materials Science (Osnovy stomatologicheskogo materialovedeniya). Edinburgh : Mosby; [M.] : KMK-Invest, 2002. 304 p. (rus)

15. Ketac™ Molar Easymix. Glass Ionomer Filling Material. Brochure. URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/2734850/ketac-molar-easymix-brochure.pdf> (date of treatment: 07.08.2022).

Information about the authors

Romanenko, Anastasia A. Postgraduate student. E-mail: neanas@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Buzov, Andrey A. PhD, technical director. E-mail: buzov@mail.ru. VladMiVa Experimental Plant JSC. Russia, 308023, Belgorod, st. Studencheskaya, 19.

Chuev, Vladimir P. DSc, Professor. E-mail: chuev@vladmiva.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Doroganov, Vladimir A. PhD, Assistant professor. E-mail: dva_vajik1975@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Onishchuk, Viktor. I. PhD, Assistant professor. E-mail: tsk_bgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Fanina, Evgenia A. DSc. E-mail: evgenia-@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 15.09.2022

Для цитирования:

Романенко А.А., Бузов А.А., Чуев В.П., Дороганов В.А., Онищук В.И., Фанина Е.А. Исследование композиционных материалов на основе алюмофторсиликатного стекла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 94–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-94-113

For citation:

Romanenko A.A., Buzov A.A., Chuev V.P., Doroganov V.A., Onishchuk V.I., Fanina E.A. Research of composite materials based on aluminofluorosilicate glass. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 94–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-94-113

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123

Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В.Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***E-mail: shabanov_dv@internet.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КОЛЕСА ТРАНСПОРТНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Для анализа путей повышения скорости движения роботизированной системы без возникновения проскальзывания колес предложен способ вычисления поперечных сил реакций, действующих на колеса. Анализ поперечных сил в дальнейшем позволит синтезировать рациональный алгоритм распределения нагрузки между приводами. Также, в работе предложено использование векторного пространства для представления кинетической энергии, что позволяет упростить вычисления при моделировании перемещения мгновенного центра скоростей и разработке системы управления.

Первая часть статьи посвящена определению зависимостей приведенной силы реакций колес от тяговых усилий приводов; от изменения расстояния до мгновенного центра скоростей; от бокового смещения мгновенного центра скоростей и от текущей скорости движения всей системы. Перечисленные зависимости определены исходя из кинематических ограничений и закона сохранения энергии.

Вторая часть статьи посвящена оценке поперечной силы, действующей на каждое колесо. Для этого используются значение приведенной силы реакций и квазистатическая модель упругого колеса. Показаны примеры применения описанного метода определения поперечных сил: проведено сравнение максимальных возможных скоростей движения без проскальзывания при различном распределении моментов между приводами и при различном расположении приводных колес в системе.

Ключевые слова: колесный робот, мобильный робот, поперечные силы колес, динамическая модель, распределение моментов, многоколесный транспорт.

Введение. Использование автономных мобильных роботов для транспортной системы автоматизированного производства обеспечивает высокую гибкость и отказоустойчивость. Одним из наиболее гибких решений является предложенная ранее концепция транспортной ячейки переменной конфигурации (ТЯПК) [1], отличающаяся использованием однотипных роботов для перемещения грузов любого размера и веса. ТЯПК представляет из себя платформу с грузом, которую тянет по заданной траектории группа двухколесных роботов. Наиболее распространенными подходами к коллективному перемещению груза роботами являются *saging* (окружение груза роботами) [2] и помещение груза непосредственно на роботов [3]. Отличием ТЯПК является то, что груз соединен с роботами через стыковочные узлы, выполняющие функцию оси вращения роботов. Это позволяет совершать сложное движение и эффективно распределять нагрузку между роботами, аналогично известным алгоритмам эффективного распределения моментов в электромобилях [4, 5]. Главным критерием таких алгоритмов является отсутствие проскальзывания колес, возникающее из-за превышения допустимой величины силы трения.

Целью работы является определение величин поперечных сил реакций колес для синтеза алгоритма эффективного распределения момен-

тов между приводами колес и для построения динамической математической модели ТЯПК и других кинематически схожих систем – например, робота, описанного в работах [6, 7]. Математическая модель должна быть сформулирована таким образом, чтобы ускорения всей роботизированной системы определялись по угловой ориентации колес и величинам тяговых сил, создаваемых приводами.

Для упрощения каждый из роботов в ТЯПК представляется как одно приводное колесо, способное вращаться вокруг вертикальной оси, как у робота Лионеля Клавьена [8], а вся ТЯПК в дальнейшем рассматривается как один робот.

В робототехнике задачи оценки сил реакций колес преимущественно рассматриваются для *skid-steering* роботов, имеющих неповорачиваемые приводные колеса [9, 10]. Результаты, полученные в этих работах, неприменимы к ТЯПК, так как *skid-steering* роботы работают с проскальзыванием колес.

Также, оценка поперечных сил реакций колес и создание динамических моделей актуальны для четырехколесного транспорта [11–14], автомобилеподобных роботов [15] и даже при проектировании асфальта посадочных полос самолетов [16, 17]. Однако, в перечисленных работах не учитываются ускорения, возникающие при повороте колес и перемещение мгновенного центра скоростей (МЦС) без изменения расстояния до

него. Более того, большинство работ основаны на моделях Дугоффа [18] и LuGre [19] и оперируют величиной «угол скольжения». Эта величина может использоваться для уточнения, но не для определения поперечных сил реакций колес. Далее величина угла скольжения принимается равной нулю для оценочного определения сил поперечных реакций колес.

$$m \frac{dv}{dt} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{roll} + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{react i} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{react}, \quad (1)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i + \mathbf{M}_{roll} + \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{react i} = \mathbf{T} + \mathbf{M}_{react}, \quad (2)$$

где n – количество приводных колес робота; m – масса робота с грузом; I – приведенный к центру масс момент инерции робота с грузом; \mathbf{v} – линейная скорость робота; ω – угловая скорость робота; \mathbf{r}_i – вектор положения i -го колеса относительно центра масс C ; \mathbf{F}_i – линейная сила, создаваемая приводом i -го колеса; $\mathbf{F}_{react i}$ – поперечная сила реакции i -го колеса; \mathbf{F}_{roll} – приведенная сила сопротивления качению; \mathbf{M}_{roll} – момент относительно центра масс, создаваемый приведенной

Сумма поперечных сил реакций колес. Аналогично методу, описанному в [20], суммарная приведенная сила реакций колес определяется через уравнения статики. Рассматриваются только силы и моменты, действующие в горизонтальной плоскости, величина крена принимается равной нулю. Величины ускорений определяются исходя из закона сохранения энергии и кинематических ограничений.

силой сопротивления качению; \mathbf{F} – приведенная сила, создаваемая приводами и силой сопротивления качению; \mathbf{T} – приведенный момент относительно центра масс, создаваемый приводами и силой сопротивления качению; \mathbf{F}_{react} – приведенная сила, создаваемая силами реакций колес; \mathbf{M}_{react} – приведенный момент, создаваемый силами реакций колес (рис. 1).

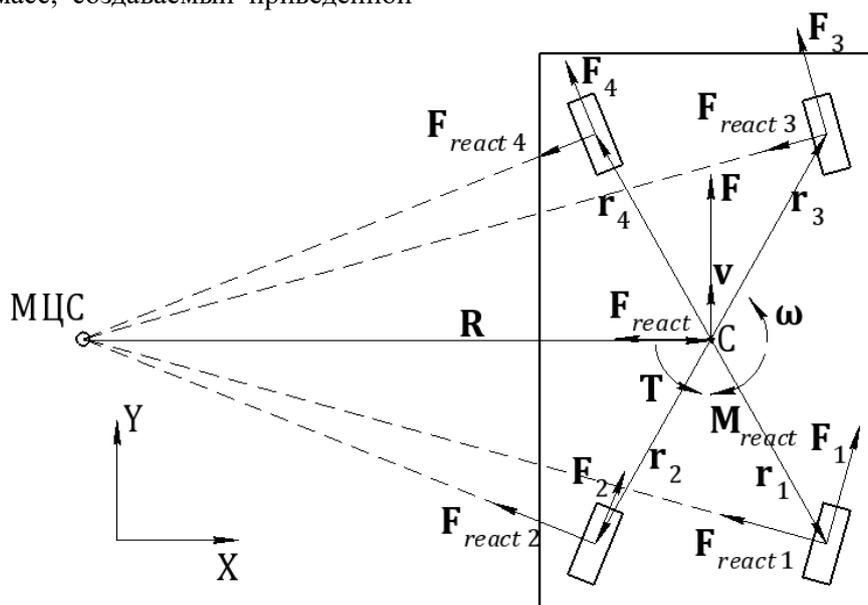


Рис. 1. Векторы сил, моментов и скоростей

Чтобы вычислить величины \mathbf{F}_{react} и \mathbf{M}_{react} , их можно представить как сумму сил и моментов, обеспечивающих соблюдение кинематических ограничений:

$$\mathbf{F}_{react} = \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_d, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{react} = \mathbf{M}_f + \mathbf{M}_r, \quad (4)$$

где \mathbf{F}_f и \mathbf{M}_f – сила и момент, возникающие от сил тяги \mathbf{F}_i , создаваемых приводами и силы сопротивления качению; \mathbf{F}_c – сила, обеспечивающая центростремительное ускорение; \mathbf{F}_r и \mathbf{M}_r – сила и момент, вызванные изменением расстояния R

от МЦС до центра масс C ; \mathbf{F}_d – сила, вызванная смещением МЦС без изменения расстояния до центра масс.

Сила \mathbf{F}_c является общеизвестной и определяется по формуле:

$$\mathbf{F}_c = -m\omega^2 \mathbf{R}, \quad (5)$$

где \mathbf{R} – вектор от мгновенного центра скоростей до центра масс.

Сила и момент, вызванные силами тяги приводных колес. Исходя из кинематических ограничений, сила \mathbf{F}_f и момент \mathbf{M}_f , создаваемые реакциями колес, должны быть такими, чтобы линейное ускорение робота \mathbf{a} было коллинеарно

вектору скорости \mathbf{v} и было связано с угловым ускорением $\boldsymbol{\varepsilon}$ соотношением $\mathbf{R} \times \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{a}$. При этом величины ускорений определяются как

$$\mathbf{a} = \frac{(\mathbf{F} + \mathbf{F}_f)}{m}; \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{(\mathbf{T} + \mathbf{M}_f)}{I}. \quad (6)$$

Момент, создаваемый приводами колес и силами сопротивления качению, относительно МЦС:

$$\mathbf{T}_{ICR} = \mathbf{R} \times \mathbf{F} + \mathbf{T}. \quad (7)$$

Угловое ускорение робота относительно центра масс равно угловому ускорению относительно МЦС, которое вычисляется через приведенный момент инерции:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\mathbf{T}_{ICR}}{(I + mR^2)}. \quad (8)$$

Из уравнений (6), (7), (8) и соотношения $\mathbf{R} \times \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{a}$ определяются значение \mathbf{M}_f и \mathbf{F}_f :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_f &= \frac{I}{I + mR^2} \mathbf{T}_{ICR} - \mathbf{T}; \\ \mathbf{F}_f &= -\frac{m}{I + mR^2} \mathbf{R} \times \mathbf{T}_{ICR} - \mathbf{F}. \end{aligned} \quad (9)$$

Сила и момент, вызванные изменением расстояния до МЦС. Колеса робота могут поворачиваться в процессе движения, изменяя рассто-

яние до мгновенного центра скоростей. Величины \mathbf{F}_r и \mathbf{M}_r должны быть такие, чтобы соблюдались закон сохранения энергии и соотношение $v = R\omega$:

$$\mathbf{F}_r = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}; \mathbf{M}_r = I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}, \quad (10)$$

$$d \left(\frac{mv(t)^2}{2} + \frac{I\omega(t)^2}{2} \right) / dt = 0. \quad (11)$$

Решение этих уравнений зависит от величины dR/dt , которую проблематично вычислить при переходе МЦС через бесконечность. Эта проблема поднималась в работе [21], однако предложенный способ ее решения является весьма трудоемким.

В связи с этим, предлагается представить кинетическую энергию в векторном пространстве. Пусть в трехмерном пространстве имеется вектор \mathbf{E}_{ks} с длиной, равной квадратному корню кинетической энергии (рис. 2). Проекции такого вектора на оси позволяют определить скорости движения системы в направлениях X, Y и скорость вращения системы вокруг оси Z.

$$\mathbf{E}_{ks} = \begin{bmatrix} E_{kx} \\ E_{ky} \\ E_{k\omega} \end{bmatrix}; E_k = E_{ks}^2 = E_{kx}^2 + E_{ky}^2 + E_{k\omega}^2, \quad (12)$$

$$E_{kx} = \sqrt{m/2} \cdot v_x; E_{ky} = \sqrt{m/2} \cdot v_y; E_{k\omega} = \sqrt{I/2} \cdot \omega. \quad (13)$$

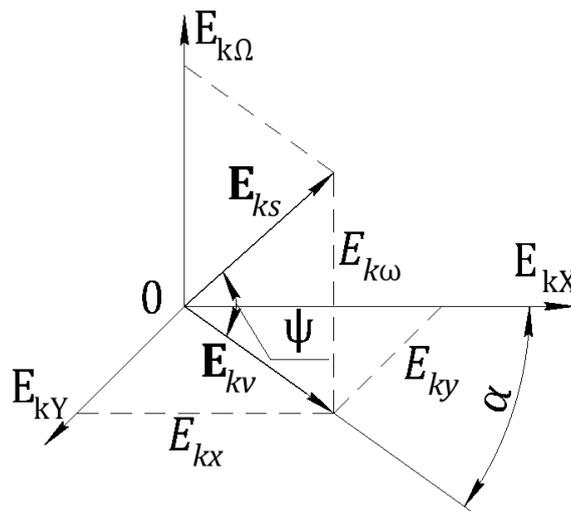


Рис. 2. Представление кинетической энергии в векторном пространстве

Ускорения, сила и момент определяются дифференцированием линейной скорости движения робота, выраженной через угол ψ :

$$\mathbf{F}_r = -m \cdot \mathbf{v} \cdot \text{tg}\psi \cdot \frac{d\psi}{dt}; \mathbf{M}_r = I \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \text{ctg}\psi \cdot \frac{d\psi}{dt}. \quad (14)$$

Сила, вызванная смещением МЦС. Для определения силы \mathbf{F}_d предположим, что колеса

робота поворачиваются таким образом, чтобы сместить мгновенный центр скоростей на угол da за время dt без изменения расстояния R . Тогда, направление вектора скорости \mathbf{v} (рис. 3) и вектора \mathbf{E}_{kv} (рис. 2) также должны повернуться на угол da . Угол da считается малым, поэтому $v(t+dt) = v(t)$. Чтобы перечисленные условия соблюдались, сила \mathbf{F}_d должна быть равна:

$$F_d = m \frac{dv}{dt} = mv \frac{d\alpha}{dt};$$

$$F_d = M_{rot} \left(\frac{\pi}{2} \right) mv \frac{d\alpha}{dt}, \quad (15)$$

где M_{rot} – матрица поворота вектора на заданный угол.

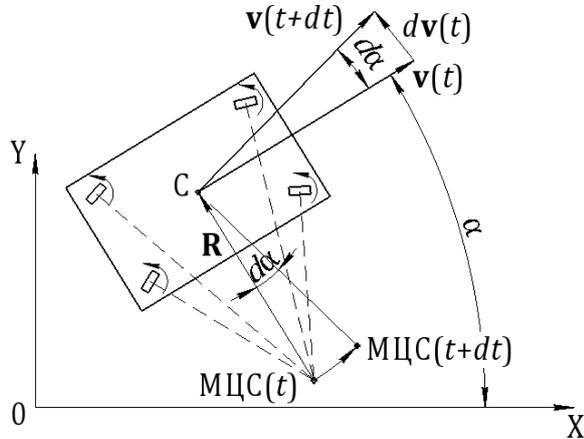


Рис. 3. Изменение направления движения системы

В глобальной системе координат необходимо учитывать скорость вращения робота:

$$F_d = M_{rot} \left(\frac{\pi}{2} \right) mv \left(\frac{d\alpha}{dt} - \omega \right). \quad (16)$$

Поперечные силы реакций каждого колеса. Определение поперечных сил реакций каждого из колес $F_{react i}$ необходимо для исследования движения многоколесных систем. Допускается, что движение происходит без возникновения проскальзывания. В существующих исследованиях поперечных сил реакций колес (например, у Jun Yang [22]) рассматривается транспорт с конкретным, заранее известным расположением колес, что позволяет использовать допущения, применимые только к одному частному случаю. Если количество приводных колес n больше трех, и их расположение произвольное, задача становится статически неопределимой с точки зрения классической механики.

Для транспорта с эластичным покрытием колес (резина, полиуретан и др.) допустимо принимать, что сила поперечной реакции колеса пропорциональна деформации эластичного слоя (рис. 4). Это тождественно закреплению каждого колеса на пружине в поперечном направлении. В дальнейшем система рассматривается в псевдостатическом состоянии.

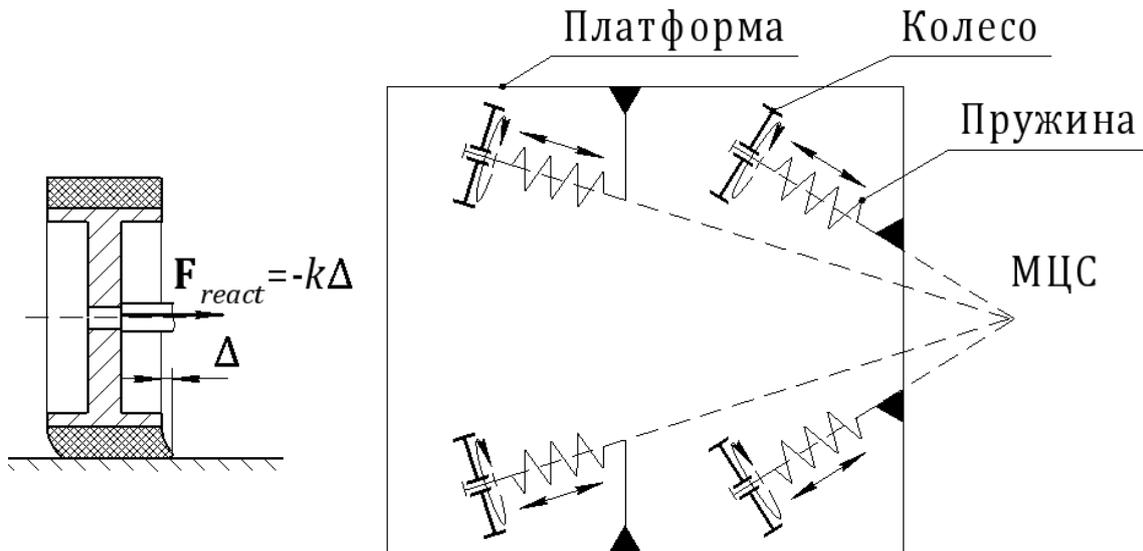


Рис. 4. Модели колеса и робота

Поперечные силы реакций колес вызваны малым смещением робота Δ :

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \phi \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Геометрически возможно определить проекцию смещения центра колеса на его поперечную ось (рис. 5). Учитывая малость угла дельта фи, получим:

$$\Delta_i = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \quad r_{wXi} \quad r_{wYi}] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 1 - \cos \Delta \phi \\ \sin \Delta \phi \end{bmatrix} = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \quad r_{wYi}] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \phi \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где r_{wXi} и r_{wYi} – положение центра масс робота в системе координат, связанной с колесом:

$$r_{wXi} = -r_i(\cos\beta_i \cos\alpha_i + \sin\beta_i \sin\alpha_i), \quad (19)$$

$$r_{wYi} = -r_i(\sin\beta_i \cos\alpha_i - \cos\beta_i \sin\alpha_i). \quad (20)$$

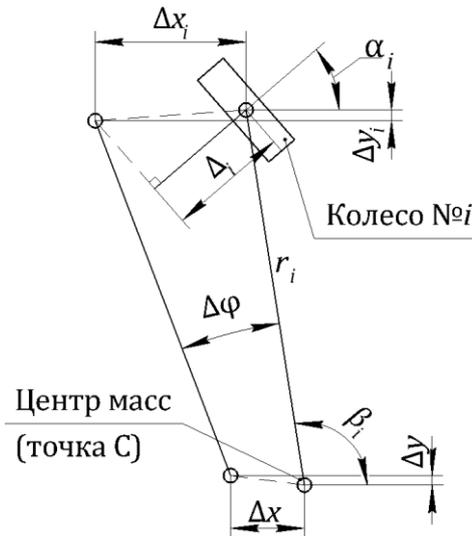


Рис. 5. Геометрические параметры положения и смещения колеса

Вектор силы реакции $\mathbf{F}_{react i}$:

$$\mathbf{F}_{react i} = -k \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \end{bmatrix} \Delta_i. \quad (21)$$

Пусть имеется некий вектор \mathbf{D}_i , включающий в себя силу $\mathbf{F}_{react i}$ и создаваемый ей момент $M_{react i}$. Сумма векторов \mathbf{D}_i будет равна сумме сил и моментов, определенных уравнениями (3), (4).

$$\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} F_{react i X} \\ F_{react i Y} \\ M_{react i} \end{bmatrix} = -k \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \\ r_{wYi} \end{bmatrix} \Delta_i, \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{D}_i = \sum_{i=1}^n -k \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \\ r_{wYi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{react X} \\ F_{react Y} \\ M_{react} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Введем матрицу \mathbf{P} размером $3 \times 3 \times n$, включающую в себя часть выражения (23) с информацией о расположении и ориентации колес. Матрица $k\Delta$ и силы поперечных реакций каждого колеса определяются из выражений (25) и (26) соответственно.

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \\ r_{wYi} \end{bmatrix} [\cos\alpha_i \quad \sin\alpha_i \quad r_{wYi}], \quad (24)$$

$$\mathbf{P} \cdot (k\Delta) = - \begin{bmatrix} F_{react X} \\ F_{react Y} \\ M_{react} \end{bmatrix}; \quad k\Delta = -\mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} F_{react X} \\ F_{react Y} \\ M_{react} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\mathbf{D}_i = -\mathbf{P}_i \cdot (k\Delta). \quad (26)$$

Если определитель матрицы \mathbf{P} близок к нулю, значение $k\Delta$ возможно приближенно вычислить с помощью алгоритмов поиска локального минимума. В качестве начального значения

для поиска берется предыдущее вычисленное значение $k\Delta$.

Применение метода определения поперечных сил реакций колес. Предложенный метод возможно использовать для определения оптимальной ориентации робота при движении по траектории или сравнения эффективности алгоритмов распределения нагрузки между приводами. Для симуляции использовалась динамическая математическая модель, построенная на основе выражений (1), (2), (3), (4) и модель системы управления, описанная в [1]. Колеса расставлены по углам прямоугольника размером 3м × 1м. Во избежание резких изменений скоростей и ускорений траектория задана сплайном Безье 4го порядка.

Масса робота с грузом $m=1000$ кг; момент инерции робота с грузом $I=1000$ кг·м²; приведенная сила сопротивления качению $F_{roll}=200$ Н.

В среде Simulink проанализированы четыре варианта движения по траектории: ориентация А - с начальным угловым положением 0° (рис. 6, а),

ориентация Б - с начальным угловым положением 90° (рис. 6, б) и с двумя различными принципами распределения нагрузки между приводами. В первом случае нагрузка равномерно, во втором - исходя из кинематики движения, когда

каждый привод стремится поддерживать заданную скорость вращения колеса с помощью П-регулятора:

$$F_i = k_p(v_i - v_i^*) = k_p r_i(\omega - \omega^*) \quad (27)$$

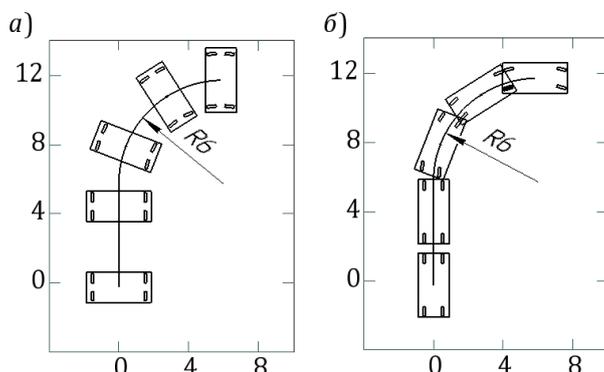


Рис. 6. Траектория движения:

а) с начальным угловым положением 0° ; б) с начальным угловым положением 90°

Варианты движения сравниваются по критерию максимальной возможной скорости движения без потери сцепления между колесом и полом. Сила трения каждого колеса $F_{fr i}$ является суммой поперечной силы $F_{react i}$ и силы F_i , создаваемой приводом. Итерационно определяется такая скорость движения робота, при которой сила трения любого колеса не превысит 122Н. При равномерном распределении нагрузки между приводами максимальные скорости движения составляют 1,16 м/с для ориентации А и 1,43 м/с для ориентации Б. При распределении по кинематическому

принципу – 1,28 м/с и 1,36 м/с соответственно. Для примера на рисунке 7 приведены графики поперечных сил и сил трения при ориентации А. Скачок сил реакций колес 1 и 2 вызван быстрым поворотом колес для перехода от прямолинейного движения к движению по дуге.

Различие между максимальными скоростями самого эффективного варианта движения (ориентация Б и равномерное распределение нагрузки) и самого неэффективного (ориентация А и равномерное распределение нагрузки) составляет 23 %. Такое различие значительно для автоматизированных транспортных систем.

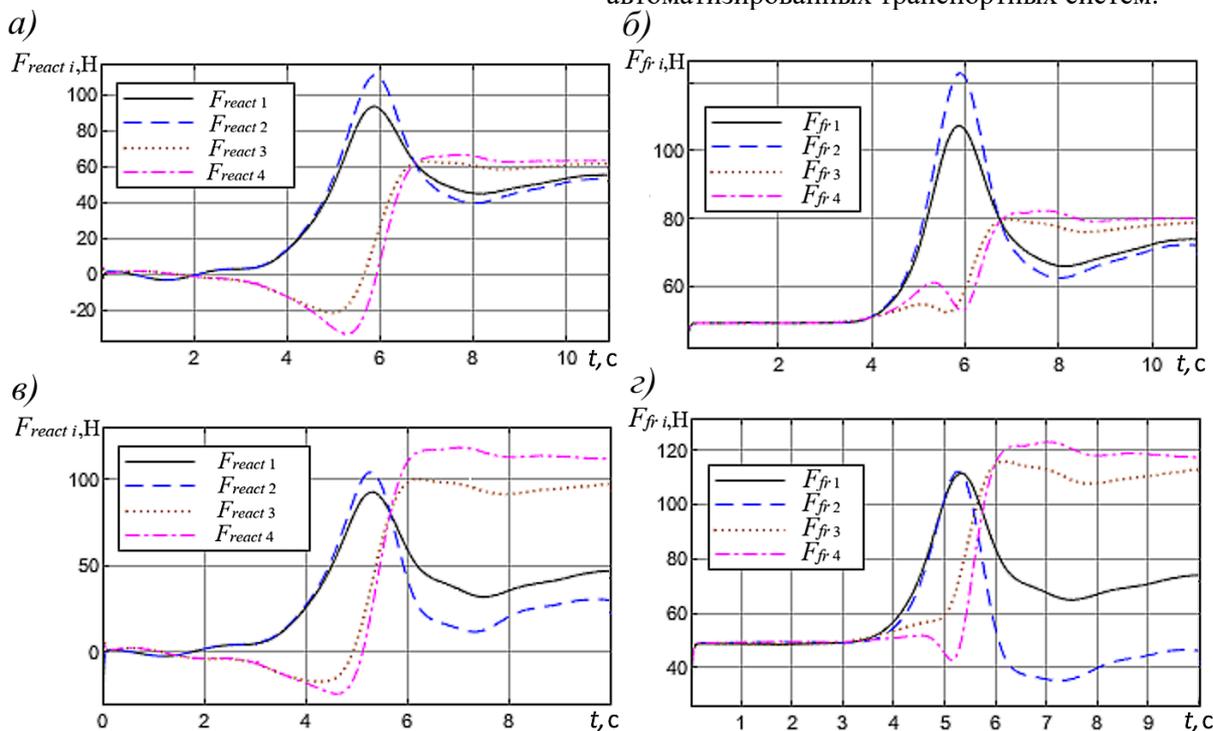


Рис. 7. Результаты симуляции для ориентации А: а – поперечные силы, при равномерном распределении; б – силы трения между колесами и полом, при равномерном распределении; в – поперечные силы, при кинематическом распределении; г – силы трения между колесами и полом, при кинематическом распределении

Также, описанный метод определения поперечных сил, действующих на колеса, в перспективе может быть использован для синтеза оптимального алгоритма распределения нагрузки между приводами.

Заключение. Метод определения поперечных реакций колес может быть использован для увеличения скорости движения многоколесных систем посредством синтеза рационального алгоритма распределения тяговых усилий между приводами колес. Также, он позволит проводить сравнение роботов с различным расположением приводных колес и сравнение траекторий и законов изменения углового положения системы по критериям пиковых величин поперечных сил и отсутствия проскальзывания. Известные зависимости сил поперечных реакций и скоростей поперечного смещения колес, такие как модель Дугоффа и другие, оперирующие углом скольжения колеса, могут быть использованы для получения более точных результатов.

Использованная в работе формализация векторного пространства для представления кинетической энергии позволит упростить создание систем управления и моделей, оперирующих положением мгновенного центра скоростей.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации программы «Приоритет 2030», стратегический проект «Человекоцентричные технологии и решения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shabanov D., Kuanyshova A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects // International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843. 017.
2. Rubenstein M., Cabrera A., Werfel J., Habibi G., McLurkin J., Nagpal R. Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments // Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems. 2013. Pp. 47–54.
3. Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Соболев М.А., Цупа А.Е. Координированное управление группой роботов в задачах перемещения груза // Вычислительные технологии. 2016. Том 21. №1. С. 70–79.
4. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method. // Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI: 10.3390/en8088537.
5. Kunjunni B., Zakaria M.A.B., Majeed A.P., Nasir A.F., Peeie M.H.B., Abdul Hamid U.Z. Effect of load distribution on longitudinal and lateral forces acting on each wheel of a compact electric vehicle // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. No. 2. Pp. 1–8. DOI: 10.1007/s42452-020-1996-9.
6. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot // International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp. 130–140. DOI: 10.1007/978-3-642-27272-1_12.
7. Dziomin U., Kabysch A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot // IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867–873. DOI: 10.1109/IDAACS.2013.6663051.
8. Clavien L., Lauria M., Michaud F. Instantaneous centre of rotation estimation of an omnidirectional mobile robot // 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA. 2010. Pp. 5435–5440. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509754.
9. Zhang H., Liang H., Tao X., Ding Y., Yu B., Bai R. Driving force distribution and control for maneuverability and stability of a 6WD skid-steering EUGV with independent drive motors // Applied Sciences. 2021. Vol. 961. No. 11. 11030961. DOI: 10.3390/app11030961.
10. Wang T., Wu Y., Liang J., Han C., Chen J., Zhao Q. Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor // Sensors. 2015. Vol. 15. Pp. 9681–9702. DOI: 10.3390/s150509681.
11. Pusca R., Ait-Amirat Y., Berthon A., Kauffmann J. M. Modeling and simulation of a traction control algorithm for an electric vehicle with four separate wheel drives // Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference. 2002. Vol. 56. No. 3. Pp. 1671–1675. DOI: 10.1109/VETECF.2002.1040500.
12. Dakhllallah J., Glaser S., Mammari S., Sebsadji Y. Tire-road forces estimation using extended kalman filter and sideslip angle evaluation // 2008 American Control Conference. 2008. Pp. 4597–4602. DOI: 10.1109/ACC.2008.4587220.
13. Doumiati M., Victorino A., Charara A., Lechner D. A method to estimate the lateral tire force and the sideslip angle of a vehicle: Experimental validation // 2010 American Control Conference. 2010. Pp. 6936–6942. DOI: 10.1109/ACC.2010.5531319.
14. Hashemi E., Pirani M., Khajepour A., Kasaiezadeh A. A comprehensive study on the stability analysis of vehicle dynamics with pure/combined slip tire models // Vehicle System Dynamics. 2016. Vol. 54. No. 12. Pp. 1736–1761. DOI: 10.1080/00423114.2016.1232417.
15. Khan H., Iqbal J., Baizid K., Zielinska T. Longitudinal and lateral slip control of autonomous

wheeled mobile robot for trajectory tracking // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2015. Vol. 16. No. 2. Pp. 166–172. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.

16. You Q., Zhang H., Ma J. Calculation of the Lateral Forces Caused by B777 Turning during Taxiing // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2019. Vol. 145. No. 1. 04018067. DOI:10.1061/JPEODX.0000092.

17. You Q., Zhang H., Ma J. Evaluation of the lateral loading caused by aircraft with complex gear configurations turning during taxiing // International Journal of Pavement Engineering. 2019. Vol. 20. No. 8. Pp. 911–919. DOI: 10.1080/10298436.2017.1366763.

18. Dugoff H., Fancher P.S., Segel L. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance // International Automobile Safety Conference. 1970. Pp. 1219–1243. DOI: 10.4271/700377.

19. De Wit C.C., Tsiotras P. Dynamic tire friction models for vehicle traction control // Proceedings of the 38th IEEE conference on decision and control (Cat. no. 99CH36304). 1999. Vol. 4. Pp. 3746–3751. DOI:10.1109/CDC.1999.827937.

20. Xu F.X., Liu X.H., Chen W., Zhou C., Cao B.W. Improving handling stability performance of four-wheel steering vehicle based on the H2/H ∞ robust control // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 5. 895. DOI: 10.3390/app9050857.

21. Sorour M., Cherubini A., Khelloufi A., Passama R., Fraisse P. Complementary-route based ICR control for steerable wheeled mobile robots // Robotics and Autonomous Systems. 2019. Vol. 118. Pp. 131–143. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.

22. Yang J., Chen W., Wang Y. Estimate lateral tire force based on yaw moment without using tire model // International Scholarly Research Notices. 2014. Art. No. 934181. DOI: 10.1155/2014/934181.

Информация об авторах

Шабанов Дмитрий Вячеславович, ассистент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Волков Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: volkov-and@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Чеусова Анна Ивановна, ассистент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: cheusova.annet@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Кочнева Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: kov_mirny@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29

Поступила 29.08.2022 г.

© Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В., 2022

***Shabanov D.V., Volkov A.N., Cheusova A.I., Kochneva O.V.**

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**E-mail: shabanov_dv@internet.ru*

ESTIMATING THE LATERAL FORCES THAT IMPACT ON THE WHEELS OF A TRANSPORT ROBOTIC SYSTEM

Abstract. A method for calculating the wheels lateral forces is proposed to analyze ways to increase the speed of the robotic system without wheel slippage appearance. The analysis of lateral forces allows to synthesize a rational algorithm for distributing the load between drives. In addition, it is proposed to use a vector space to represent kinematic energy, which simplify simulation of the instant center of rotation movements and simplify control system development. The first part of the article is devoted to finding the relationship between the summary lateral force and the drives traction forces; the changing the distance to the instant center of rotation; the lateral movement of the instant center of rotation and the current speed of the entire system. The listed relationships are found through kinematic constraints and the energy conservation law. The second part is devoted to the evaluation of the lateral force acting on each wheel. Thus, the value of the reduced reaction force and the quasi-static model of an elastic wheel are used. Examples of using the proposed method are shown: a comparison of the maximum possible speeds of motion without slippage for different distribution of

moments between drives and for different arrangement of drive wheels in the system is carried out.

Keywords: wheeled robot, mobile robot, lateral wheel force, dynamic model, torque distribution, multi-wheel vehicle.

REFERENCES

1. Shabanov D., Kuanyshova A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects. International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843.
2. Rubenstein M., Cabrera A., Werfel J., Habibi G., McLurkin J., Nagpal R. Collective transport of complex objects by simple robots: theory and experiments. Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems. 2013. Pp. 47–54.
3. Zolotukhin I.U.N., Kotov K.Iu., Maltsev A.S., Nesterov A.A., Sobolev M.A., TSupa A.E. Coordinated control of a group of robots in the moving cargo tasks [Koordinirovannoe upravlenie gruppoy robotov v zadachah peremeshcheniya gruzha], Vychislitel'nye Tekhnologii. 2016. Vol. 21. No. 1. Pp. 70–79 (rus).
4. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method. Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI: 10.3390/en8088537.
5. Kunjuni B., Zakaria M. A. B., Majeed A. P., A Nasir A. F., Peeie M. H. B., Abdul Hamid U. Z. Effect of load distribution on longitudinal and lateral forces acting on each wheel of a compact electric vehicle. SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. No. 2. Pp. 1–8. DOI: 10.1007/s42452-020-1996-9.
6. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot. International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp.130–140. DOI: 10.1007/978-3-642-27272-1_12.
7. Dziomin U., Kabysch A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot. IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867–873. DOI: 10.1109/IDAACS.2013.6663051.
8. Clavien L., Lauria M., Michaud F. Instantaneous centre of rotation estimation of an omnidirectional mobile robot. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA. 2010. Pp. 5435–5440. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509754.
9. Zhang H., Liang H., Tao X., Ding Y., Yu B., Bai R. Driving force distribution and control for maneuverability and stability of a 6WD skid-steering EUGV with independent drive motors. Applied Sciences. 2021. Vol. 961. No. 11. 11030961. DOI: 10.3390/app11030961.
10. Wang T., Wu Y., Liang J., Han C., Chen J., Zhao Q. Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor. Sensors. 2015. Vol. 15. Pp. 9681–9702. DOI: 10.3390/s150509681.
11. Pusca R., Ait-Amirat Y., Berthon A., Kauffmann J. M. Modeling and simulation of a traction control algorithm for an electric vehicle with four separate wheel drives. Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference. 2002. Vol. 56. No. 3. Pp. 1671–1675. DOI: 10.1109/VETECONF.2002.1040500.
12. Dakhlallah J., Glaser S., Mammari S., Sebsadji Y. Tire-road forces estimation using extended kalman filter and sideslip angle evaluation. 2008 American Control Conference. 2008. Pp. 4597–4602. DOI: 10.1109/ACC.2008.4587220.
13. Doumiati M., Victorino A., Charara A., Lechner D. A method to estimate the lateral tire force and the sideslip angle of a vehicle: Experimental validation. 2010 American Control Conference. 2010. Pp. 6936–6942. DOI: 10.1109/ACC.2010.5531319.
14. Hashemi E., Pirani M., Khajepour A., Kasaiezadeh A. A comprehensive study on the stability analysis of vehicle dynamics with pure/combined slip tire models. Vehicle System Dynamics. 2016. Vol. 54. No. 12. Pp. 1736–1761. DOI: 10.1080/00423114.2016.1232417.
15. Khan H., Iqbal J., Baizid K., Zielinska T. Longitudinal and lateral slip control of autonomous wheeled mobile robot for trajectory tracking. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2015. Vol. 16. No. 2. Pp. 166–172. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.
16. You Q., Zhang H., Ma J. Calculation of the Lateral Forces Caused by B777 Turning during Taxiing. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2019. Vol. 145. No. 1. 04018067. DOI:10.1061/JPEODX.0000092.
17. You Q., Zhang H., Ma J. Evaluation of the lateral loading caused by aircraft with complex gear configurations turning during taxiing. International Journal of Pavement Engineering. 2019. Vol. 20. No. 8. Pp. 91–919. DOI: 10.1080/10298436.2017.1366763.
18. Dugoff H., Fancher P.S., Segel L. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance. International Automobile Safety Conference. 1970. Pp. 1219–1243. DOI: 10.4271/700377.

19. De Wit C. C., Tsiotras P. Dynamic tire friction models for vehicle traction control. Proceedings of the 38th IEEE conference on decision and control (Cat. no. 99CH36304). 1999. Vol. 4. Pp. 3746–3751. DOI:10.1109/CDC.1999.827937.

20. Xu F.X., Liu X.H., Chen W., Zhou C., Cao B.W. Improving handling stability performance of four-wheel steering vehicle based on the H₂/H_∞ robust control. Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 5. 895. DOI: 10.3390/app9050857.

21. Sorour M., Cherubini A., Khelloufi A., Passama R., Fraisse P. Complementary-route based ICR control for steerable wheeled mobile robots. Robotics and Autonomous Systems. 2019. Vol. 118. Pp. 131–143. DOI: 10.1016/j.robot.2019.02.011.

22. Yang J., Chen W., Wang Y. Estimate lateral tire force based on yaw moment without using tire model. International Scholarly Research Notices. 2014. 934181. DOI: 10.1155/2014/934181.

Information about the authors

Shabanov, Dmitrii V. Teaching assistant. E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Volkov, Andrey N. DSc, Professor. E-mail: volkov-and@yandex.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Cheusova, Anna I. Teaching assistant. E-mail: cheusova.annet@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Kochneva, Olga V. PhD, Assistant professor. E-mail: kov_mirny@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Received 29.08.2022

Для цитирования:

Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В. Определение поперечных сил, действующих на колеса транспортной роботизированной системы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123

For citation:

Shabanov D.V., Volkov A.N., Cheusova A.I., Kochneva O.V. Estimating the lateral forces that impact on the wheels of a transport robotic system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-124-134

Марусич К.В., Дружинин В.И.Оренбургский государственный университет***E-mail: mkv82@mail.ru*

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МОБИЛЬНОГО РАСТОЧНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация. Обеспечить высокую точность механической обработки труднодоступного габаритного оборудования при выполнении ремонтных работ вне машиностроительного предприятия зачастую является недостижимой задачей. Поэтому актуальным в настоящее время является отказ от этих операций в пользу использования специализированных мобильных станков, которые позволят существенно сократить стоимость и сроки таких ремонтов. Сейчас на рынке широко представлены мобильные станки зарубежных фирм для обработки крупногабаритных изделий. Их стоимость начинается от 3,5 млн. руб., при этом технологическая оснастка для расширения возможностей станка считается опцией и не входит в базовую комплектацию. Это существенно влияет на выбор такого оборудования малыми и средними предприятиями, которые занимаются восстановлением и ремонтом различных поверхностей крупногабаритных изделий. Таким образом, развитие отечественной станкоинструментальной промышленности делает актуальным разработки различных конструкций мобильных станков с целью импортозамещения в машиностроительной отрасли России. В данной работе представлена конструкция мобильного расточного станка, выполняющего обработку внутренних поверхностей по управляющей программе с требуемой точностью за счет использования следящих приводов движения. Так же дополнительно был выполнен инженерный анализ конструкции с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: станок, мобильный, приставной, переносной, механическая обработка.

Введение. На основании проведенного обзора конструкций мобильных станков [1–13] были сформулированы следующие основные проблемы, с которыми сталкиваются машиностроительные предприятия при ремонте крупногабаритных изделий:

- большая трудоемкость, а иногда невозможность извлечения узлов из эксплуатационных помещений;
- высокая квалификация рабочих при выполнении разборки и сборки узлов и агрегатов, в которые входит ремонтируемое изделие;
- нередко получение специальных разрешений и использование специализированной техники для транспортирования крупногабаритных изделий до ремонтного предприятия;
- большие сроки и высокая стоимость ремонта крупногабаритных изделий.

Распоряжение Правительства РФ от 5 ноября 2020 г. № 2869-р «Об утверждении Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года» так же подчёркивает актуальность разработки мобильных станков с целью импортозамещения в машиностроительной отрасли России.

Исходными данными для разработки конструкции мобильного станка являются: назначение станка (для обработки тел вращения, или же корпусных деталей), примерные габариты и вес станка, материал обработки и величина припусков, метод обработки, требуемая точность обработки, режимы обработки и так далее.

Основная часть. В качестве прототипа был взят мобильный станок для механической обработки уплотнительных поверхностей задвижек и вентилях напорных элементов [14]. Он включает в себя неподвижное основание с размещённым в нём приводом главного движения. На нём установлена планшайба, к которой прикреплен суппорт с резцом, реализующий радиальную и осевую подачи. Они осуществляются за счёт винтовых механизмов, ходовые винты которых кинематически связаны с приводной шестерней, свободно вращающейся на планшайбе. Данная конструкция из-за сложностей при настройке на обрабатываемый размер имеет ограниченное применение.

Разработанная конструкция (рис. 1) позволит расширить технологические возможности станка и проводить механическую обработку внутренних фасонных поверхностей за счёт упрощения методики настройки на обрабатываемый размер. Технический результат достигается за счёт того, что в борштанге мобильного расточного станка установлен привод подачи каретки, который перемещает резец, позволяя изменять диапазон обработки (от 20 до 327 мм). Для этого в качестве привода используются шаговые двигатели с управлением от системы числового программного управления.

В ходе выполнения работы были проведены следующие расчёты: кинематический расчёт, выбор двигателей (главного движения и подач), расчёт зубчатых колёс и шарико-винтовой передачи.

На рис. 2 представлена кинематическая схема разработанного мобильного станка для обработки внутренних поверхностей.



Рис. 1. 3D-модель мобильного расточного станка для обработки внутренних поверхностей

Конструкция разработанного мобильного станка (рис. 3) включает: борштангу 1; каретку 2; крышку борштанги 3; крышку станины 4; направляющие 5–8; основание 9; станину 10; винты 11, 20–23, 25–27, 45–48; губки 12; опоры 13; шлицевый вал 14; зубчатые передачи 14–18; фланец 19; болт 24; гайки 28–29; муфту 30; подшипники 31–35; прихват 36; гравёрные шайбы 37–40; шпонки 41–43; штифты 44 и 50; резец 49; двигатель главного движения 51; двигатели подач 52 и 53.

Принцип установки мобильного расточного станка на изделие представлен на рисунке 4. На базовую поверхность обрабатываемого изделия он устанавливается своим основанием 9 с помощью четырех опор 13. Которые в свою очередь зажимаются губками 12, приводящиеся в движение винтами 11 и через гравёрную шайбу 40 зажимаются контргайками 29. Опоры крепятся к основанию 9 при помощи винтов 45, которые не подвергаются раскручиванию от вибрации при помощи гравёрных шайб 39.

Регулирование положения оси основания осуществляется с помощью регулировочных клинов или пластин (позицией не обозначено).

Несущей системой выступает станина 10, на которой размещаются все остальные элементы мобильного станка. Для того чтобы выставить оси X и Y предусмотрены регулировочные винты 20 и 21. Винт 20 смещает станину относительно основания 9 при помощи передачи винт-гайка. Для перемещения в направлении Z отвечают направляющие 6, приводящиеся в движение при помощи винтов шарико-винтовой пары 22. Винты получают вращение от синхронизированных шаговых двигателей 52 через соединительные муфты 30. Шаговые двигатели 52 крепятся к фланцам 19 при помощи винтов 25. Фланцы 19 располагаются на крышке 4, которая базируется на станине 10 при помощи точных посадочных пальцев и крепится винтами 47. Крышка 4 выступает ответной частью для направляющей привода главного движения 8. Данная направляющая нужна для того, чтобы при выставлении оси в направлении Y, ось привода главного движения 51 могла перемещаться соосно с направляющей шлицевого вала 7, которая крепится к направляющей 5 при помощи винтов 38. Направляющая 5 выступает базовой деталью для борштанги 1. Промежуточными элементами будут являться радиально-упорные шариковые подшипники 31.

Для того чтобы спрогнозировать поведение разработанного станка в реальных условиях работы был выполнен инженерный анализ его конструкции на основе метода конечных элементов в САЕ-системе «ANSYS Workbench» [15, 16]. Этот анализ используется для определения напряжений и деформаций в условиях статического нагружения конструкции. Он включает в себя оценку статических перемещений мобильного станка, вызванных расчётными силами резания.

Предварительно исходная сборочная модель станка была адаптирована для проведения конечно-элементного анализа путём максимального возможного упрощения геометрии ее компонентов. Данное упрощение включало в себя удаление из сборки мелких компонентов (винты, гайки, шайбы и т.п.) и удаление мелких геометрических элементов с тел крупных компонентов (отверстия, фаски, галтели и т.п.), априорно не способных существенно повлиять на деформации рассматриваемой конструкции. Кроме того, в рамках этой предварительной подготовки редактировались размеры некоторых сопряжённых компонентов, что было призвано впоследствии обеспечить получение корректных моделей стыков (контактных пар).

В результате полученная геометрическая модель станка была импортирована в программную среду, где на её основе была построена соответствующая конечно-элементная модель.

При построении этой модели были приняты следующие допущения:

- физико-механические свойства всех компонентов станка описываются линейно-упругой моделью изотропного материала, соответствующего конструкционной стали;

- статические перемещения вершины режущего инструмента преимущественно определяются деформациями несущей его борштанги и непосредственно связанных с ней компонентов станка;

- контактные деформации компонентов в их неподвижных (затянутых) стыках не оказывают существенного влияния на баланс перемещений в рабочей зоне станка.

Расчётная сетка, сгенерированная с учетом принятых допущений, была гибридной, то есть состояла из тетраэдрических и гексаэдрических конечных элементов, плотность которых варьировалась в зависимости от размера разбиваемого компонента (рис. 5).

Для компонентов, образующих принятые в расчёт подвижные стыки, сетка дополнительно детализировалась на поверхностях контактного интерфейса. При этом модели стыков формировались в полуавтоматическом режиме с использованием специальных контактных конечных элементов. Соответственно для подвижных стыков назначался стандартный (скользящий) контакт с трением, а для неподвижных стыков контакт, предполагающий абсолютно жёсткое соединение сопряжённых тел (рис. 6).

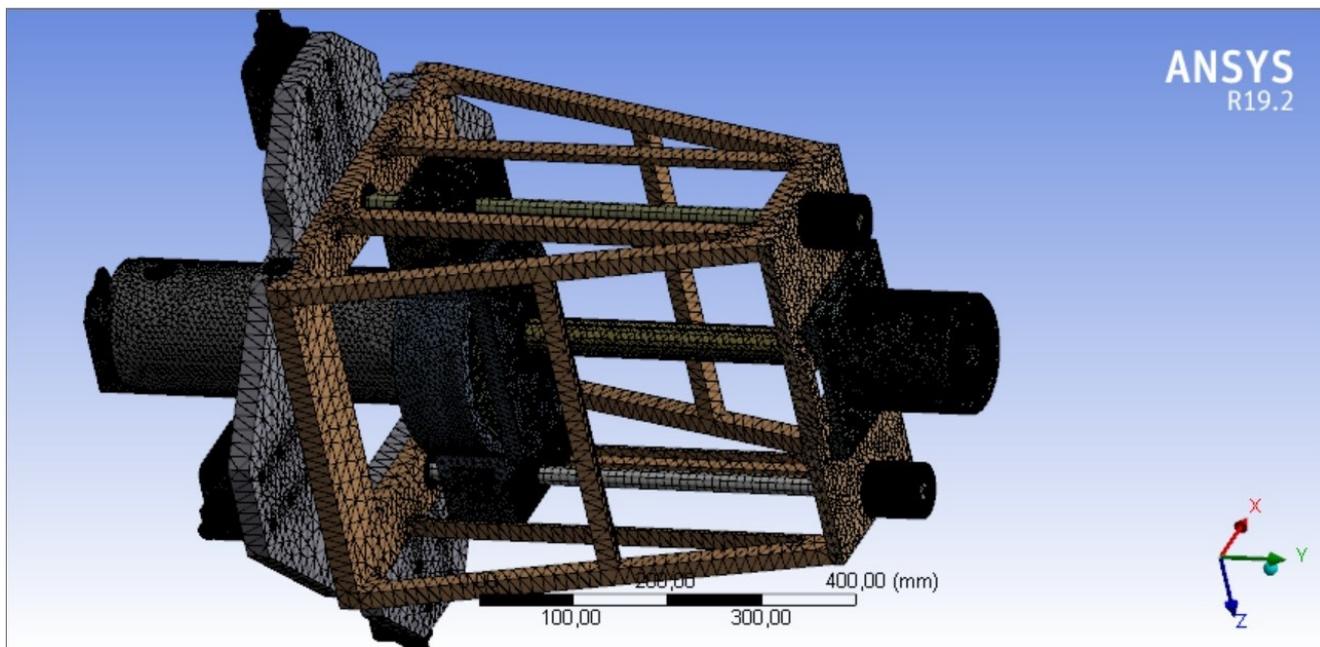


Рис. 5. Построение сеточной модели

Граничные условия модели определялись нулевым ограничением (жёсткой фиксацией) всех степеней подвижности, заданным на опор-

ной поверхности фрагмента обрабатываемого изделия, который специально был воспроизведён в расчётной модели.

Нагрузки, заданные в модели, определялись силой резания. Вектор силы резания складывался из трех вычисленных составляющих ($P_x=100$ Н, $P_y=201$ Н и $P_z=671$ Н), и задавался на передней поверхности режущего инструмента (рис. 7). Силы затяжки задавались на поверхностях четырёх винтов и принимались равными 5

кН, что гарантировало надёжное закрепление при приложенной силе резания. Для учёта деформаций станка, обусловленных собственным весом его компонентов, в модели также задавалась объёмная инерционная нагрузка в форме ускорения свободного падения, вектор которого направлялся вертикально вниз от станка.

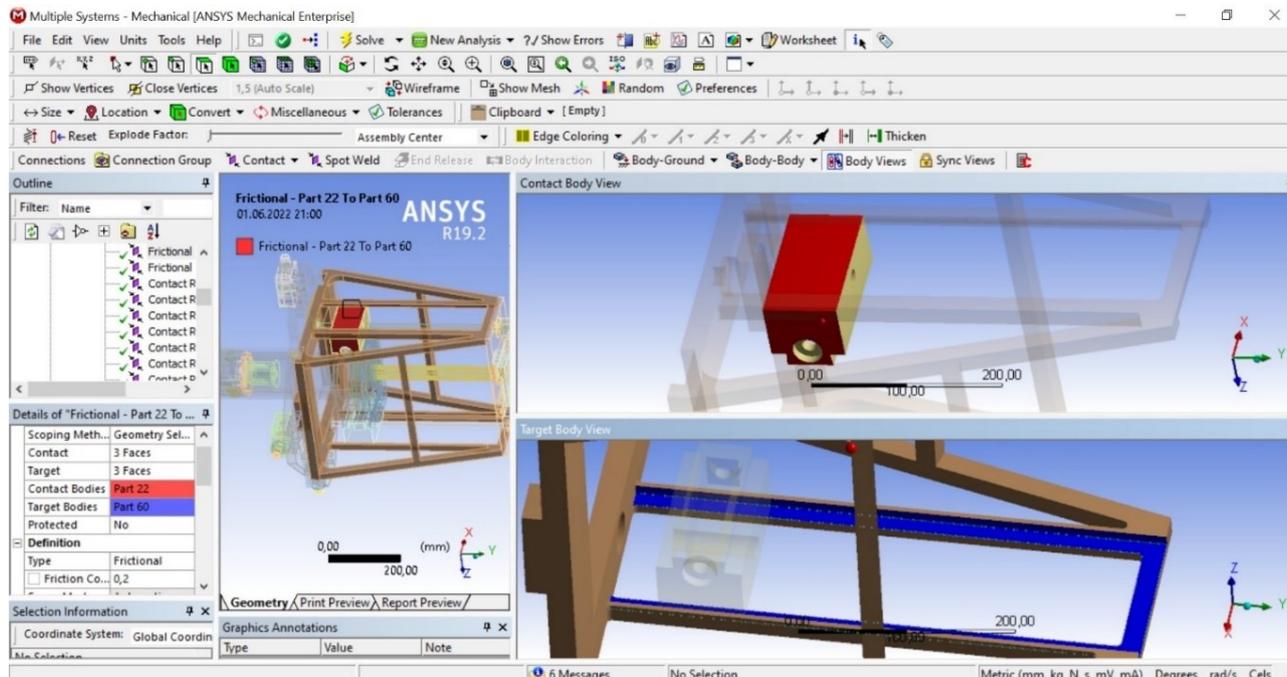


Рис. 6. Проработка стыков в ANSYS Workbench

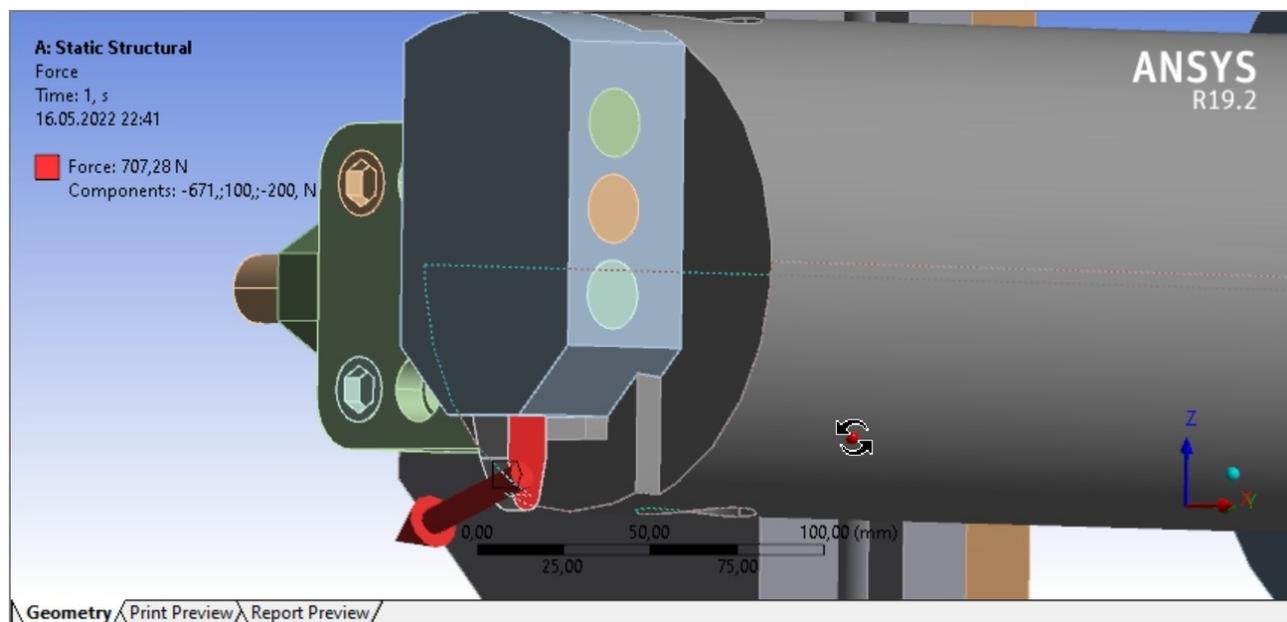


Рис. 7. Приложенные нагрузки в модели

Величины суммарного перемещения вершины режущего инструмента и деформаций элементов станка приведены на рисунке 8 при крайнем нижнем положении борштанги, так как

именно там будет наиболее худшая ситуация, в связи с максимальным вылетом борштанги.

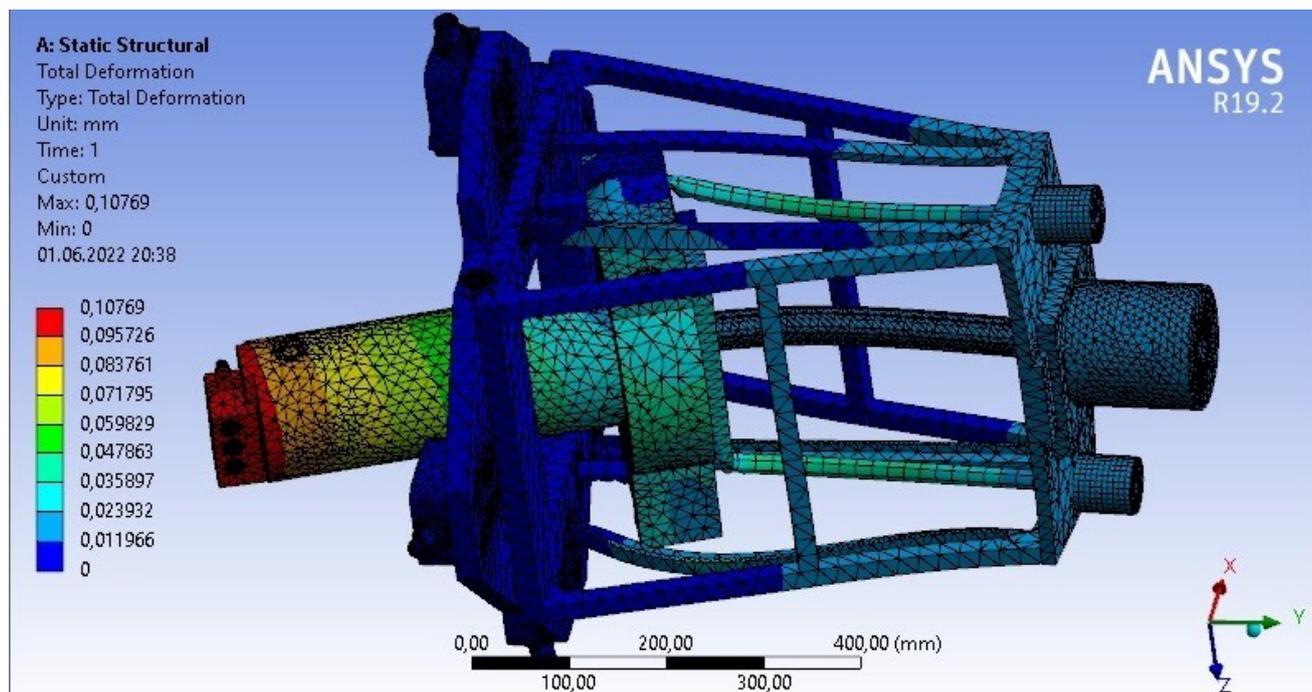


Рис. 8. Суммарные статические перемещения станка

Анализ показывает, что предлагаемая конструкция станка не обладает высокой жёсткостью из-за порталной конструкции и, следовательно, не обеспечивает высокой размерной точности обработки.

Однако задачи, для решения которых предлагается использовать данный мобильный станок, не требуют высокой размерной точности обработки, в связи с чем его точность можно считать приемлемой для его эффективной эксплуатации. Тем не менее, остается открытым вопрос обеспечения точности формы обработанного отверстия на разработанном станке, которая имеет большое значение для нормального функционирования обрабатываемого изделия. Решение этого вопроса требует проведения дополнительных расширенных расчётов, связанных с оценкой динамического отклика станка, и является предметом его дальнейших исследований.

При рассмотрении условий реальной эксплуатации разработанного мобильного станка с большой долей вероятности можно предположить, что станок будет испытывать динамические нагрузки, приближенно изменяющие по закону гармонических колебаний с некоторой частотой. В связи с этим возникает опасность вступления конструкции станка в возможный резонанс с действующими на него возмущающими нагрузками, что чревато резким ухудшением характеристик станка и даже его поломкой.

Для оценки возможности возникновения резонансных явлений в станке был выполнен его модальный анализ, направленный на определение собственных частот и форм колебаний его конструкции. В качестве инструментального средства анализа использовалась САЕ-система «ANSYS Workbench».

Анализ производился на основе результатов статического анализа с учётом напряжений, обусловленных рабочими нагрузками (предварительно напряжённый модальный анализ). В ходе каждого случая анализа определялись двадцать соответствующих им форм колебаний. Результаты анализа представлены на рисунке 9.

Полученные результаты показывают, что в случае предварительно напряжённого модального анализа, первая собственная частота изменяется в диапазоне от 100 Гц и выше, что практически исключает возможность возникновения резонансных явлений в процессе обработки на станке. Данный вывод следует из предположения того, что частота возмущающей нагрузки, действующей на станок в процессе точения, будет определяться частотой вращения борштанги. Частота вращения, опасная в отношении резонанса, должна составлять не более 6000 об/мин. При обработке не предполагается использовать частоты вращения свыше 1500 об/мин, так что резонансные явления можно исключить.

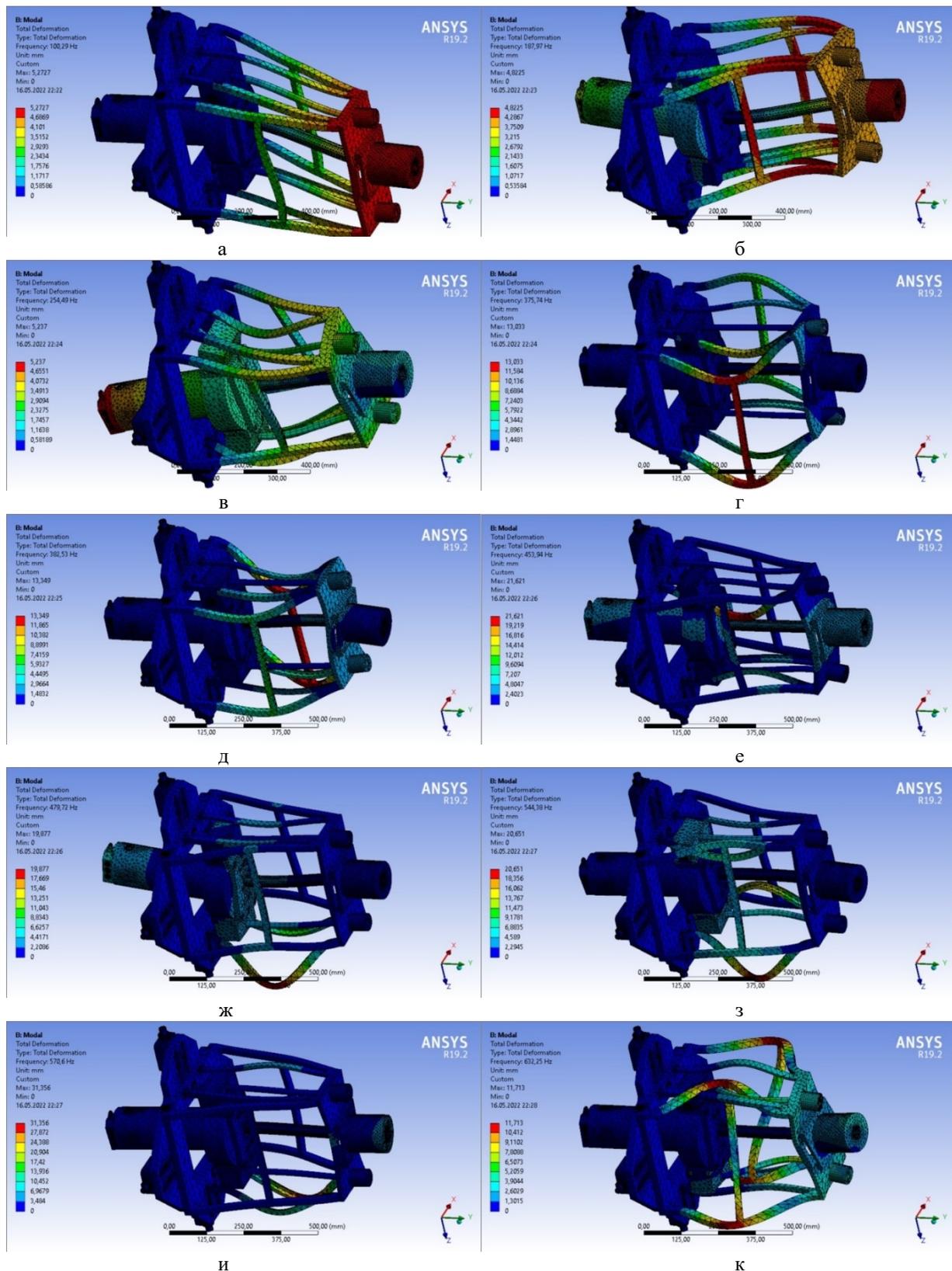


Рис. 9. Формы собственных колебаний

- а) 1 мода (100,29 Гц), б) 3 мода (187,97 Гц), в) 5 мода (254,49 Гц), г) 7 мода (375,74 Гц), д) 9 мода (382,53 Гц), е) 11 мода (453,94 Гц), ж) 13 мода (479,72 Гц), з) 15 мода (544,38 Гц), и) 17 мода (570,6 Гц), к) 19 мода (632,25 Гц)

Вывод. По сравнению с прототипом разработанная конструкция позволяет расширить технологические возможности мобильного расточ-

ного станка и выполнять механическую обработку внутренних фасонных поверхностей, расположенных внутри изделия. Так же за счёт использования шаговых двигателей с управлением

от системы числового программного управления упрощается методика настройки станка на заданный размер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимофеев С.П., Гаврилов Д.В., Хуртасенко В.А., Воронкова М.Н. Новая модель станка для обработки поверхностей крупногабаритных деталей-тел вращения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 8. С. 94–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-8-94-100
2. Марусич К.В., Дружинин В.И. Обзор конструкций мобильных станков для обработки крупногабаритных изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 9. С. 97–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-97-112
3. Куликовский М.Ю., Петрова Д.П., Шапошников А.М. Мобильный станок для обточки бандажей (колёс) колёсных пар // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2020. № 1. С. 82–86.
4. Liu J., Tian Y., Gao F. A novel six-legged walking machine tool for in-situ operations // Front. Mech. Eng. 2020. № 15. Pp. 351–364. DOI: 10.1007/s11465-020-0594-2
5. Tao B., Zhao X., Ding H. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study // Science China. Technological Sciences. 2019. Vol. 62. № 8. Pp. 1388–1400. DOI: 10.1007/s11431-019-9510-1
6. Бойко П.Ф., Тимирязев В.А., Хостикоев М.З., Данилов И.К. Применение мобильного многоцелевого станка для восстановления отверстий в крупногабаритных деталях без их демонтажа // СТИН. 2018. № 11. С. 25–29.
7. Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Козлов А.А. Расширение технологических возможностей мобильного фрезерного оборудования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 140–145. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.4.022
8. Boiko P.F., Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I. K. Hole restoration in situ using a mobile machine tool, without disassembly // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. № 4. Pp. 345–348. DOI: 10.3103/S1068798X19040038
9. Uriarte L., Zatarain M., Axinte D., Yague-Fabra J., Ihlenfeldt S., Eguia J., Olarra A. Machine tools for large parts // CIRP Annals. 2013. № 62. Pp. 731–750. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.009
10. Neugebauer R., Priber U., Rentzsch H., Ihlenfeldt S., Hoffmann D. Mobile systems for machining large work pieces // Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability - 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011). 2012. Pp. 135–140.
11. Allen J., Axinte D., Roberts P., Anderson R. A review of recent developments in the design of special-purpose machine tools with a view to identification of solutions for portable in situ machining systems // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. № 50. Pp.843-857. DOI: 10.1007/s00170-010-2559-9
12. Koriath H.-J., Scheffler C., Kolesnikov A., Paetzold J., Lindner R. Energetische Bilanzierung und bewertung von werkzeugmaschinen // eniPROD Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Germany. 2010. Pp. 157–184.
13. Okazaki Y., Mishima N., Ashida K. Microfactory – concept, history and developments // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. 2004. № 126(4). Pp. 837–844. DOI: 10.1007/s00170-009-2411-2
14. Пат. 2144449, Российская Федерация, МПК В 23 В 41/00. Переносной станок для механической обработки / Д.А. Белашов, В.В. Худяков; заявитель и патентообладатель Д.А. Белашов, В.В. Худяков. № 98119058/02; заявл. 19.10.1998; опубл. 20.01.2000. 2 с.
15. Polyakov A. N., Kamenev S.V. More efficient use of CAE systems in machine tool design // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. № 1. Pp. 67–71. DOI: 10.3103/S1068798X10010156
16. Zhuang Z.-W., Lu J.-C., Liu De.-S. A novel identification technique of machine tool support stiffness under the variance of structural weight // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119. Pp. 247–259. DOI: 10.1007/s00170-021-08257-y

Информация об авторах

Марусич Константин Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: mkv82@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, пр. Победы, д. 13.

Дружинин Валерий Иванович, магистрант кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: www.kingsing1999.18@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, пр. Победы, д. 13.

Поступила 25.07.2022 г.

© Марусич К.В., Дружинин В.И., 2022

***Marusich K.V., Druzhinin V.I.**

Orenburg State University

*E-mail: mkv82@mail.ru

DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF A MOBILE BORING MACHINE FOR PROCESSING INTERNAL SURFACES

Abstract. *It is often an unattainable task to ensure high accuracy of machining of hard-to-reach overall equipment when performing repair work outside a machine-building enterprise. Therefore, it is currently relevant to abandon these operations in favor of the use of specialized mobile machines, which will significantly reduce the cost and time of such repairs. Now the market is widely represented by mobile machines of foreign companies for processing large-sized products. Their cost starts from 3.5 million rubles, while technological equipment for expanding the capabilities of the machine is considered an option and is not included in the basic package. This significantly affects the choice of such equipment by small and medium-sized enterprises that are engaged in the restoration and repair of various surfaces of large-sized products. Thus, the development of the domestic machine-tool industry makes the development of various designs of mobile machine tools relevant for the purpose of import substitution in the Russian machine-building industry. This paper presents the design of a mobile boring machine that performs the processing of internal surfaces according to the control program with the required accuracy through the use of servo motor drives. Additionally, an engineering analysis of the structure is performed using the finite element method.*

Keywords: machine, mobile, attached, portable, machining.

REFERENCES

1. Timofeev S.P., Gavrilov D.V., Hurtasenko V.A., Voronkova M.N. New model of machine for processing surfaces of large-sized parts having the shape of bodies of rotation [Novaya model' stanka dlya obrabotki poverhnostej krupnogabaritnyh detalej-tel vrashcheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 8. Pp. 94–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-8-94-100 (rus)
2. Marusich K.V., Druzhinin V.I. Overview of mobile machine designs for large-sized products [Obzor konstrukcij mobil'nyh stankov dlya obrabotki krupnogabaritnyh izdelij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 9. Pp. 97–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-97-112 (rus)
3. Kulikovskiy M.Y., Petrova D.P., Shaposhnikov A.M. Mobile machine for turning bandages (wheels) of wheel pairs [Mobil'nyj stanok dlya obtochki bandazhej (kolyos) kolyosnyh par]. History and prospects of development of transport in the north of Russia. 2020. No. 1. Pp. 82–86. (rus)
4. Liu J., Tian Y., Gao F. A novel six-legged walking machine tool for in-situ operations. Front. Mech. Eng. 2020. No. 15. Pp. 351–364. DOI: 10.1007/s11465-020-0594-2
5. Tao B., Zhao X., Ding H. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study. Science China. Technological Sciences. 2019. Vol. 62. No. 8. Pp. 1388–1400. DOI: 10.1007/s11431-019-9510-1
6. Boiko P.F., Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I. K. Hole restoration in situ using a mobile machine tool, without disassembly [Primenenie mobil'nogo mnogoceleevogo stanka dlya vostanovleniya otverstij v krupnogabaritnyh detalyah bez ih demontazha]. STIN. 2018. No. 11. Pp. 25–29. (rus)
7. Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V., Kozlov A.A. Expansion of technological capabilities of mobile milling equipment [Rasshirenie tekhnologicheskikh vozmozhnostej mobil'nogo frezernogo oborudovaniya]. Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2019. Vol. 15. No. 4. Pp. 140–145. DOI 10.25987/VSTU.2019.15.4.022 (rus)
8. Boiko P.F., Timiryazev V.A., Khostikoev M.Z., Danilov I. K. Hole restoration in situ using a mobile machine tool, without disassembly. Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39. No. 4. Pp. 345–348. DOI: 10.3103/S1068798X19040038 (rus)
9. Uriarte L., Zatarain M., Axinte D., Yague-Fabra J., Ihlenfeldt S., Eguia J., Olarra A. Machine tools for large parts. CIRP Annals. 2013. No. 62. Pp. 731-750. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.009
10. Neugebauer R., Priber U., Rentzsch H., Ihlenfeldt S., Hoffmann D. Mobile systems for machining large work pieces. Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability - 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011). 2012. Pp. 135–140.
11. Allen J., Axinte D., Roberts P., Anderson R. A review of recent developments in the design of special-purpose machine tools with a view to identification of solutions for portable in situ machining systems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. No. 50. Pp. 843–857. DOI: 10.1007/s00170-010-2559-9
12. Koriath H.-J., Scheffler C., Kolesnikov A., Paetzold J., Lindner R. Energetische Bilanzierung

und bewertung von werkzeugmaschinen. eniPROD Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Germany. 2010. Pp. 157–184.

13. Okazaki Y., Mishima N., Ashida K. Microfactory - concept, history and developments. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. 2004. No. 126(4). Pp. 837–844. DOI: 10.1007/s00170-009-2411-2

14. Belashov D.A. Portable working machine tool. Patent RF, no. 2144449, 2000.

15. Polyakov A. N., Kamenev S.V. More efficient use of CAE systems in machine tool design. Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. No. 1. Pp. 67–71. DOI: 10.3103/S1068798X10010156 (rus)

16. Zhuang Z.-W., Lu J.-C., Liu De.-S. A novel identification technique of machine tool support stiffness under the variance of structural weight. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119. Pp. 247–259. DOI: 10.1007/s00170-021-08257-y

Information about the authors

Marusich, Konstantin V. PhD, Assistant professor. E-mail: mkv82@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Druzhinin, Valery I. Master student. E-mail: www.kingsing1999.18@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Received 25.07.2022

Для цитирования:

Марусич К.В., Дружинин В.И. Разработка конструкции мобильного расточного станка для обработки внутренних поверхностей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 124–134. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-124-134

For citation:

Marusich K.V., Druzhinin V.I. Development of the design of a mobile boring machine for processing internal surfaces. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 124–134. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-124-134