

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

9

2024

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

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

№ 9, 2024 год

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

Vol. 9. 2024

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	16.09.2024
Выход в свет	

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15. Уч.-изд. л. 16,13. Тираж 40 экз. Заказ № ____

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

- 2.1.1. – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 2.1.3. – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 2.1.5. – Building materials and products (technical sciences)
- 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 2.1.13. – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 2.1.14. – Life-cycle management of construction projects (technical sciences)
- 2.6.14. – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 2.5.4. – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 2.5.5. – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 2.5.6. – Engineering technology (technical sciences)
- 2.5.21. – Machines, aggregates and technological processes (technical sciences)

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	16.09.2024

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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).

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

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

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

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, научный руководитель АО «КТБ Железобетон» (РФ, г. Москва).

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

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

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

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).

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

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

Лесовик Руслан Валерьевич, д-р техн. наук, проректор по международной деятельности, проф. кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

Мешерин Виктор Сергеевич, PhD, проф., директор института строительных материалов и заведующий кафедрой строительных

материалов Дрезденского Технического Университета (Германия, г. Дрезден).

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

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

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

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

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

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

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

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

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф. кафедры градостроительства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (РФ, г. Санкт-Петербург).

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

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

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

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

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

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

Тодорович Гордана, PhD, проф. технологии и информационных систем Шумадийской академии профессионального образования (Республика Сербия, г. Крагуевац).

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

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

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

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

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

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, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Architecture, Professor, Samara State Technical University, Academy of Construction and Architecture (Russian Federation, Samara).

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

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).

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

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

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

Aleksey N. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, KTB Beton Group (Russian Federation, Moscow).

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

Vladimir T. Erofeev, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of civil engineering (National research university) (Russian Federation, Moscow).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Valeriya V. 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).

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

Gordana Todorovic, PhD, Professor of Technology and Information Systems at the Sumadija Academy of Vocational Education (Republic of Serbia, Kragujevac).

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

Лебедев М.С., Ядыкина В.В., Выродова К.С. ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА ШУНГИТА РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО	8
Соловьев В.Г., Матюшин Е.В. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ	26
Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА	40
Тимофеев П.С. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЗЛА МОНОЛИТНОГО БЕЗБАЛОЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ СО СТАЛЕБЕТОННОЙ КОЛОННОЙ, С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕЗНОГО БАЛОЧНОГО УЗЛА, С УЧЕТОМ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ БЕТОНА И СТАЛИ	49
Чесноков А.В., Михайлов В.В. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ШПРЕНГЕЛЬНОГО ТИПА	60
Дмитриева Т.Л., Черняго А.Б. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ	72
Шеин В.В. ЭСТЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВХОЖДЕНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СТРУКТУРУ ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ	81
Олейников А.А., Гнездилов Д.В. ПРИМЕНЕНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕНОВАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ	95

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Берро Сомар, Тимофеев А.Н., Кочнева О.В. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАНИПУЛЯЦИОННОЙ РЕАБИЛИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕМОРА КУЛЬТИ ЧЕЛОВЕКА	106
Загороднюк Л.Х., Богданов В.Н., Кикалишвили Е.Н., Газиев Х.Х., Сумской Д.А. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СМЕЩЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ АДСОРБИРУЮЩЕГО ГИГИЕНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА	118
Ханин С.И., Малахов М.А., Мордовская О.С., Анциферов С.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ГРОХОЧЕНИЯ НА ВИБРАЦИОННОМ ГРОХОТЕ С СОСТАВНОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ШПАЛЬТОВОГО СИТА	131

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Lebedev M.S., Yadykina V.V., Vyrodova K.S. EFFECT OF COMPOSITION PECULIARITIES OF SHUNGITE FROM VARIOUS DEPOSITS ON STRUCTURE FORMATION OF POLYMER MODIFIED BITUMEN BINDER	8
Soloviev V.G., Matiushin E.V. MECHANICAL PROPERTIES OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF STEEL FIBER	26
Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh. TECHNOLOGICAL APPROACHES TO IMPROVING THE QUALITY OF FINE-GRAIN CONCRETE	40
Timofeev P.S. NUMERICAL INVESTIGATION OF THE MONOLITHIC BEAMLESS SLAB CONNECTION WITH A STEEL CONCRETE COLUMN USING SHEAR BEAM CONNECTION, CONSIDERING THE JOINT WORK OF CONCRETE AND STEEL	49
Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. TECHNIQUE FOR ANALYSIS OF HYBRID ROOF STRUCTURE OF THE STRUTTED TYPE	60
Dmitrieva T.L., Chernyago A.B. THE ASSESSMENT OF HIGHWAY MAINTAINABILITY INDICATORS	72
Shein V.V. AESTHETICAL MODELS OF INCLUSION RECOVERED INDUSTRIAL OBJECTS INTO EXSISTING URBAN STRUCTURE	81
Oleinikov A.A., Gnezdilov D.V. APPLICATION OF BIM TECHNOLOGIES DURING THE RENOVATION AND RECONSTRUCTION OF URBAN AREAS	95

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Berro S., Timofeev A.N., Kochneva O.V. POSITIONING THE WORKING ORGAN OF REHABILITATION SYSTEM IN THE PRESENCE OF HUMAN STUMP TREMOR	106
Zagorodnyuk L.Kh., Bogdanov V.N., Kikalishvili E.N., GazievKh.Kh., Sumskoy D.A. STUDYING THE PROCESS OF MIXING THE MAIN COMPONENTS OF AN ADSORBENT HYGIENIC PRODUCTS	118
Khanin S.I., Malakhov M.A., Mordovskaya O.S., Antsiferov S.I. INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE SCREENING PROCESS ON A VIBRATING SCREEN WITH A COMPOSITE CONSTRUCTION OF A TRELLIS SIEVE	131

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-8-25

^{1,2}*Лебедев М.С., ²Ядыкина В.В., ²Выродова К.С.¹Национальный исследовательский Томский государственный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: michaelL1987@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА ШУНГИТА РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

Аннотация. Введением наполнителей в полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) преследуют цели уменьшения количества дорогостоящих полимеров, улучшения технологических, физико-механических, теплофизических и других свойств дорожных материалов. В связи с этим в последние годы возрос интерес к природным материалам, которые по составу близки и имеют сопоставимые характеристики с синтетическими продуктами. Применительно к графеновым структурам, часто используемым для модифицирования битумов и полимеров, хорошей альтернативой представляется шунгит – горная порода, являющаяся, по сути, композиционным материалом из смеси шунгитового углерода и минеральных фаз. Отличительные особенности состава шунгита должны положительно сказаться на структурировании битумной матрицы в присутствии полимера при использовании шунгитового порошка в качестве модификатора ПБВ. Поскольку важнейшей структурной компонентой породы является углерод, то целью настоящей работы было изучение влияния шунгитового углерода из пород различных месторождений на структурообразование полимерно-битумного вяжущего. Комплексом исследований (дифференциальная сканирующая калориметрия, рамановская спектроскопия, энергодисперсионная спектроскопия на базе сканирующего электронного микроскопа) установлено, что углерод из образцов семи месторождений Карелии характеризуется разной степенью упорядоченности графитоподобных (sp^2 -углеродных) структур в зависимости от места отбора. Увеличение в составе шунгитового порошка количества углерода и снижение степени упорядоченности его структуры определяют более высокие значения удельной поверхности и больший эффект от модифицирования при введении наполнителей в полимерно-битумное вяжущее. Наиболее активными наполнителями с высоким модифицирующим эффектом являются образцы Зажогинского месторождения, максимально улучшающие когезионную прочность композиционного органического вяжущего и в наилучшей степени структурирующие систему. Порошки из пород других месторождений также оказывают положительное влияние относительно базового ПБВ, но с меньшей эффективностью. Все это говорит о перспективности предлагаемой модификации.

Ключевые слова: шунгит, углерод, степень упорядоченности структуры, полимерно-битумное вяжущее, модифицирующий эффект.

Введение. В настоящее время модификации битума уделяется повышенное внимание, поскольку эффективность работы асфальтобетонного покрытия во многом зависит от характеристик вяжущего. Однако битум является термопластичным материалом, поэтому его размягчение при летних температурах вызывает пластические деформации, а зимняя хрупкость приводит к возникновению низкотемпературного растрескивания. Улучшить свойства битума позволяет его модификация полимерными добавками, например, термоэластопластами типа сополимера стирола и бутадиена (СБС) [1–3]. Однако достаточно высокая стоимость таких добавок приводит к необходимости поиска путей снижения ее содержания без потери качества. Одним из путей решения этой проблемы является использование наполненных полимеров, которые достаточно широко используются в других отраслях

[4–6]. Наполнители влияют на технологические, физико-механические, теплофизические и другие свойства материалов, кроме того, они, как правило, уменьшают их стоимость, поскольку в большинстве случаев дешевле полимеров.

Среди наполнителей особый интерес представляет использование углеродных модификаторов, представляющих собой по сути 2D-наноструктуры (sp^2 -углерод): графеновые структуры, углеродные нанотрубки, нановолокна, технический углерод [7–11]. Авторы [12] на примере частиц биоугля отмечают, что углерод в качестве модификатора является очень перспективным, благодаря хорошей совместимости углеродистой составляющей с органической фракцией битума, а также определенной структуре (пористая/волокнистая для биоугля) для сильного взаимодействия с битумной матрицей. Введением углерода в битумные вяжущие добиваются повышения

жесткости при высоких температурах, что улучшает стойкость к колееобразованию [13, 14], повышения эластичности [15], устойчивости к старению [16]. В работе [17] замедление темпов старения битума, модифицированного углем от пиролиза автомобильных шин, связывают с высоким содержанием углерода, за счет чего может обеспечиваться более равномерное распределение его внутри битумной матрицы благодаря высокой совместимости с химической природой битума и установлению более эффективных взаимодействий. Также отмечается улучшение адгезии модифицированных техническим углеродом вяжущих к каменному материалу, что объясняют наличием на поверхности углеродного материала различных функциональных групп (гидроксильных, карбонильных и др.) [15]. Одной из идей, развиваемой в последнее время, является залечивание трещин в асфальтовом покрытии (самовосстановление), реализуемом за счет восприимчивости битумных вяжущих с электропроводящими углеродными модификаторами к микроволновому излучению [18, 19].

В последние годы возрос интерес к природным материалам, которые по составу близки и имеют сопоставимые характеристики с синтетическими продуктами, такими как, углеродные нанотрубки, графены, оксиды графена. К таким материалам относится, в частности, шунгит – горная порода, состоящая из углерода и минеральных фаз. Именно наличием шунгитового углерода обусловлены многие его полезные свойства: высокая адсорбционная способность, электро- и теплопроводность, бактерицидные, каталитические, восстановительные свойства, а также способность экранировать электромагнитные и радиоизлучения [20]. Несмотря на более чем вековую историю исследования и применения шунгита, до сих пор однозначно идентифицировать структуру шунгитового углерода не удалось в виду его рентгеноаморфности. Существуют разные точки зрения. На сегодняшний день его структуру на атомно-молекулярном уровне представляют на основе стопок из графеновых сеток с увеличенным по сравнению с графитом межплоскостным расстоянием [21]. Углеродных слоев в пакетах, по данным ряда исследований, от 5 до 14. Большинство из этих слоев изогнуты и, возможно, замыкаются на себя, формируя фуллереноподобные частицы (глобулы), либо встраиваются в связующие межглобулярные слои разупорядоченного (турбостратного) углерода. По мнению В.В. Ковалевского [22], на надмолекулярном уровне фундаментальным структурным элементом шунгитового углерода является фуллереноподобная глобула размером

около 10 нм. Помимо фуллереноподобных глобул надмолекулярная структура шунгитового углерода может быть пачечной, чешуйчатой и пленочной. Также в шунгите была обнаружена одна из уникальных аллотропных модификаций углерода – фуллерены, однако их концентрация в породе очень низка [23]. Сложная и многоуровневая структура шунгитового углерода в сочетании с распределением его в объеме горной породы и взаимодействием с характерными минеральными включениями (кварцем, полевыми шпатами, слюдами, сульфидами металлов (пирит, сфалерит) и др.), определяют уникальность и многообразие свойств шунгитов, которые находят применение при использовании в качестве активного наполнителя или модификатора в различных композиционных материалах. Например, присутствие гидрофильных и гидрофобных частиц, формирующих дифильные агрегаты, позволяет получать высоконаполненные (300–400 мас. ч.) полимерные композиты с хорошими эксплуатационными характеристиками, включая защитные свойства от электромагнитного излучения [24]. Хорошая совместимость шунгитового наполнителя с полимерами дает основания предполагать эффективность его применения в системах на основе битумных вяжущих. При этом, возможно как прямое введение порошка в полимерно-битумное вяжущее, так и косвенное, через полимерный носитель.

Принимая во внимание все вышеизложенное, отличительные особенности состава шунгита должны положительно сказаться на структурировании битумной матрицы в присутствии полимера при использовании шунгитового порошка в качестве модификатора полимерно-битумного вяжущего и улучшении его свойств, что было показано ранее проведенными исследованиями [25]. Поскольку важнейшей структурной компонентой породы является углерод, то целью настоящей работы было изучение влияния шунгитового углерода из пород различных месторождений на структурообразование полимерно-битумного вяжущего.

Методы и материалы.

Материалы. Базовое полимерно-битумное вяжущее готовилось на основе полимера типа СБС марки KTR-401 (производства компании Korea Kumho Petrochemical Co., Ltd), пластификатора Унипласт (производства ООО «Селена» г. Шебекино, Белгородская область) и битума БНД 70/100 Московского НПЗ.

Содержание полимера, согласно предварительному подбору для получения ПБВ 60, отвечающего требованиям ГОСТ 52056-2003, составило 3,5 %, пластификатора 1,5 %. Содержание шунгита составило 5 % от массы ПБВ.

В работе исследовались образцы Карельского шунгита следующих месторождений:

- ✓ Образец № 1 – Максово;
- ✓ Образец № 2 – Шуньга;
- ✓ Образец № 3 – Тетюгино;
- ✓ Образец № 4 – Березовец;
- ✓ Образец № 5 – Чеболакша;
- ✓ Образец № 6 – Зажого-1;
- ✓ Образец № 7 – Зажого-2.

Образцы № 6 и 7 были отобраны из одного места отбора Зажогинского месторождения через длительный временной промежуток (соответственно, отбор производился из разных пластов породы) и обозначены как «Зажого-1» и «Зажого-2», соответственно.

Отобранные образцы горной породы усреднялись, дробились и измельчались в мельнице до тонкости, обеспечивающей полный проход через сито с диаметром отверстий 0,071 мм.

Методы. Химический состав порошков шунгита определялся рентгенофлуоресцентным анализом на спектрометре ARL 9900 WorkStation (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария).

Содержание углерода в исследуемых образцах и термические эффекты при разложении углерода определялись методами термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе STA 449F1 Jupiter (Netzsch - Geratebau GmbH, Германия) при скорости нагрева 10 градусов/мин в воздушной атмосфере.

Структурные особенности шунгитового углерода изучались методом рамановской (комбинационного рассеяния (КР)) спектроскопии. Спектры регистрировались на спектрометре i-Raman Plus 785H (B&W Tek, США). Возбуждение осуществлялось лазером с длиной волны 785 нм при мощности 13,5 мВт, время экспозиции составляло 200 с.

Микроструктурные особенности частиц углерода изучались на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (TESCAN, Чехия). Изображения получены в режимах SE (secondary electrons – вторичные электроны) и BSE (back-scattered electrons – обратно рассеянные электроны). Элементный состав отдельных участков СЭМ-изображений выполнялся с помощью энергодисперсионного спектрометра X-MAX 50 (Oxford Instruments NanoAnalysis, Великобритания) на базе электронного микроскопа.

Удельная поверхность шунгитовых порошков определялась методом БЭТ (Брунауэра-Эммета-Теллера) на приборе BELSORP-miniX (MicrotracBEL Corp., Япония).

Приготовление полимерно-битумных вяжущих осуществлялось по традиционной технологии в лабораторных условиях с помощью мешалки L5T (Silverson, Великобритания). Введение порошков шунгита осуществлялось на первой стадии получения модифицированных вяжущих: в базовое ПБВ, разогретое до температуры 160 °С, вводилось 25–50 % порошка от массы ПБВ в зависимости от вязкости получаемой смеси и перемешивалось в течение 5 минут на скорости 2500 об/мин. На второй стадии концентрированное связующее разбавлялось базовым ПБВ без порошка из расчета доведения концентрации шунгита 5 мас.%. Перешивание осуществлялось при температуре 160 °С первые 15 минут на высокой скорости 6500–7000 об/мин, завершающие 5 минут – на пониженной скорости до 800 об/мин. По окончании перемешивания визуально оценивалась однородность модифицированного ПБВ с помощью стеклянной палочки. Двухстадийная технология необходима для равномерного распределения шунгита в полимерно-битумном вяжущем, поскольку в более концентрированной суспензии частицы порошка за счет соприкосновения и трения друг о друга распределяются более равномерно, формируя однородную массу, чего нельзя достичь при одностадийном процессе.

Для базового и модифицированных шунгитом ПБВ определялись максимальное усилие при растяжении при 25 °С в соответствии с ГОСТ 33138-2014, температура размягчения по ГОСТ 33142-2014. Методом конической пластометрии определялось предельное напряжение сдвига при погружении острого конуса (угол при вершине 30°) в битумное вяжущее под действием постоянной нагрузки. Суть метода заключается в следующем: подготовленное вяжущее помещалось в бюксы высотой 2 см и выдерживалось в течение 40 минут при температуре 20 °С; затем конус приводился в соприкосновение с поверхностью исследуемого материала и определялась глубина его погружения. Далее рассчитывалось предельное напряжение сдвига по формуле

$$p_s = k \frac{P}{h^2},$$

где P – нагрузка, Н; h – глубина погружения конуса, м; k – постоянная конуса, зависящая от его угла при вершине (для угла 30° $k=1,1$).

Основная часть.

1. Состав шунгитовых порошков

Материнские шунгитовые породы и получаемые из них порошки представляют собой, по сути, композиционные материалы из смеси шунгитового углерода и минеральной части, включа-

ющей преимущественно силикатные и алюмосиликатные фазы (табл. 1). Исследуемые образцы из различных месторождений имеют значительные отличия в содержании углерода и составе минеральной части (табл. 1). Количество углерода определялось по кривой потери массы ТГ в области температур 400–800 °С (рис. 1). Наименьшее количество углерода характерно для образца шунгита месторождения Березовец (№ 4) (21,5 мас. %), наибольшее – для № 2 (месторождение Шуньга) (47,4 мас. %) (рис. 1, а). Стоит отметить определенную зависимость между содержанием углерода и составом минеральной части – с повышением количества углерода увеличивается и содержание других соединений (Fe_2O_3 , K_2O , MgO , SO_3 , CaO , TiO_2 , P_2O_5 и

др.) – для проб № 2 и 3 (Тетюгино) значения наибольшие (18,9 и 15,5 мас. %, соответственно) (табл. 1). Для образца из Шуньги (№ 2) также характерно наибольшее содержание алюмосиликатов (наибольшее количество Al_2O_3), что согласуется с результатами других исследователей, которые отмечали прямую зависимость между содержанием углерода и глиноземистой составляющей [26]. Увеличенная доля алюмосиликатов с примесями Mg, Fe, K может свидетельствовать о значительном содержании анизотропных слюдистых фаз, которые могут вносить определенный вклад в процессы наполнения и структурирования битума этими образцами шунгита.

Таблица 1

Химический состав порошков шунгита различных месторождений

Компоненты	Содержание, мас.%, в пробе						
	1	2	3	4	5	6	7
C*	31,9	47,4	40,8	21,5	28,9	32,6	32,3
SiO_2	58,8	26,2	41,5	68,0	61,2	56,6	55,0
Al_2O_3	4,4	7,5	2,2	4,4	3,9	4,2	4,4
Другие	4,9	18,9	15,5	6,1	6,0	6,6	8,3

* Содержание углерода было определено по потере массы методом термogrавиметрии

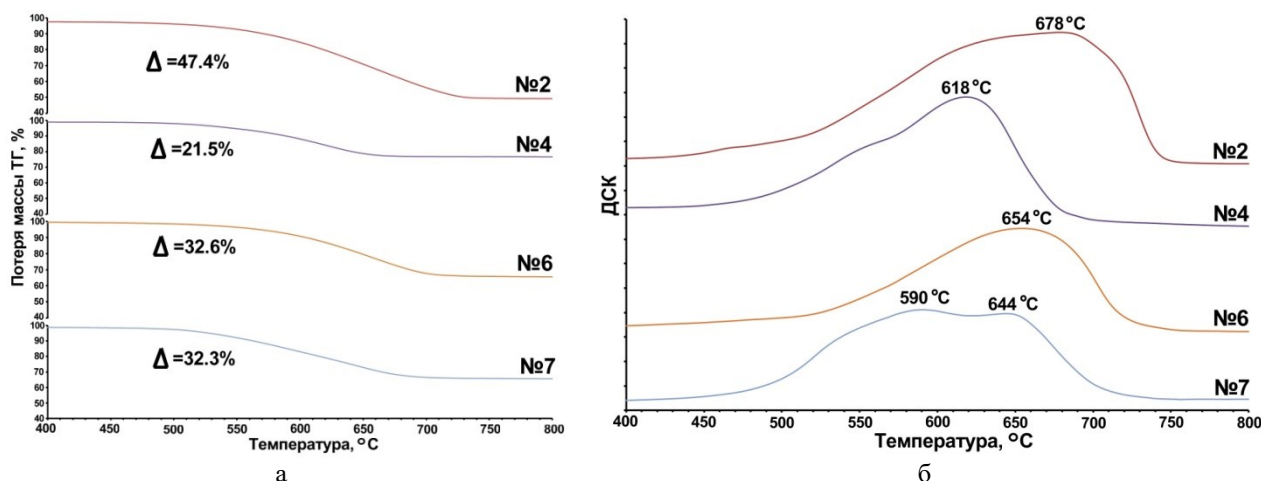


Рис. 1. Кривые потери массы (а) и ДСК (б) исследуемых образцов шунгита (масштаб представления данных по оси ординат одинаков для всех проб; на рисунках приведены самые представительные кривые)

Таким образом, место отбора материнских пород шунгита определяет состав получаемых порошков: в образцах разнятся не только содержание шунгитового углерода, но и качественный, и количественный фазовый состав минеральной части, что необходимо учитывать при прогнозировании свойств модифицированных шунгитовым порошком полимерно-битумных вяжущих.

2. Особенности структуры углерода порошков шунгита

Поскольку главной особенностью шунгита является присутствие в его составе рентгено-аморфного углерода, целесообразно подробно

изучить этот компонент природного композиционного материала. Именно с ним связывают уникальные свойства этих горных пород, благодаря которым объясняется широкий спектр применений в различных сферах промышленности, например, в качестве наполнителей полимерных материалов и резин [24, 27], радиопоглощающего материала [28], в составе мелкозернистого бетона [29].

По результатам ДСК все изученные порошкообразные образцы из шунгита имеют различное положение экзотермического пика, описывающего выгорание шунгитового углерода (рис. 1, б), что может быть связано не только с его количеством, но и степенью его упорядоченности. По

данным других исследований, температура выгорания углерода прямо пропорциональна степени упорядоченности его структуры [30–32]. Для некоторых проб пиковые температуры выгорания углерода близки между собой: пробы из Максово (№ 1), Шуньги (№ 2) и Чеболакши (№ 5) – температуры 686,4 °С, 678,5 °С и 671,9 °С, соответственно; пробы из месторождений Тетюгино (№ 3) и Березовец (№ 4) – температуры 620,7 °С и 618,4 °С, соответственно; пробы из Зажогоино (№ 6 и 7) – температуры 654,1 °С и 643,6 °С (второй пик), соответственно, (табл. 2). Для пробы № 7 характерно наличие явного второго экзотермического пика в районе 589,9 °С, что может говорить о присутствии углерода различной степени упорядоченности. В некоторых образцах (№ 2 и 4) на кривой ДСК (рис. 1, б) есть перегибы кривой левее основного пика, что также может свидетельствовать о присутствии углерода с меньшей степенью упорядоченности, однако их количество значительно меньше, чем в пробе № 7. Таким образом, во многих пробах углерод представляет собой смесь фрагментов с различ-

ной степенью упорядоченности, поэтому достаточно затруднительно на основе первичных результатов ДСК-измерения сделать вывод о структурной упорядоченности шунгитового углерода.

Другой важнейшей термографической характеристикой углерода является температура начала экзотермического эффекта (начала выгорания), которая также характеризует степень упорядоченности углеродных слоев в структуре графитоподобного углерода: чем она ниже, тем менее структурирован углерод [33]. Но даже здесь этот показатель может охарактеризовать лишь присутствие в том или ином образце наименее структурированного углерода из всей его массы: исходя из этого в порошках шунгита месторождений Шуньга (№ 2), Березовец (№ 4) и Зажогоино-2 (№ 7) имеются фрагменты с менее упорядоченной структурой, чем в пробах из Максово (№ 1) и Зажогоино-1 (№ 6) (табл. 2). В целом, это согласуется с графическими данными ДСК, где в первой серии образцов имеются более-менее заметные перегибы в области 450–600 °С (рис. 1, б).

Таблица 2

Показатели термического анализа, косвенно характеризующие структуру углерода

Образец	Содержание углерода по данным ТГ, мас. %	Примерная температура выгорания углерода, °С		Температурный диапазон выгорания, °С ($T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}$)	Удельный диапазон выгорания углерода, °С/% углерода	Пиковые температуры выгорания углерода, °С	Значение ДСК на пике выгорания углерода, мкВ/мг	
		начала	завершения				измеренное	пересчитанное для углерода
1	31,9	500	780	280	8,8	686,4	4,8	14,9
2	47,4	430	750	320	6,8	678,5	5,4	11,5
3	40,8	450	720	270	6,6	620,7	8,1	19,9
4	21,5	440	700	260	12,1	618,4	4,8	22,4
5	28,9	480	710	230	8,0	671,9	6,7	23,2
6	32,6	510	750	240	7,4	654,1	4,4	13,6
7	32,3	440	740	300	9,3	589,9; 643,6	4,1	12,8

Для количественной характеристики структуры углерода по данным ДСК на роль усредненного показателя больше подходит удельный диапазон выгорания, рассчитанный путем деления температурного интервала выгорания углерода на его количество (табл. 2). Чем больше выгорает 1 % углерода, тем более упорядочена его структура. Исходя из этого, наиболее упорядоченным с большим отрывом является образец № 4 (Березовец), а наименее упорядоченными – № 3 (Тетюгино), № 2 (Шуньга) и № 6 (Зажогоино-1). Это, в целом, неплохо согласуется со значениями функции ДСК на пике выгорания, пересчитанными на углерод, исходя из его содержания в пробе: для образца № 4, который содержит углерод с наибольшей степенью упорядоченности, процесс выгорания сопровождается большими

тепловыми затратами; углерод в образцах № 2 и 6 – наоборот. Однако и в этом случае есть исключения: в пробах из Тетюгино (№ 3) и Чеболакши (№ 5) 1 % углерода выгорает достаточно быстро при большом значении ДСК. Возможно, на скорость термической деструкции углерода помимо степени структурной упорядоченности влияют другие факторы: размеры частиц порошка (количество слоев графена и их искривленность), дисперсность самого порошка, однородность и характер взаимодействия с окружающей минеральной матрицей, наличие примесей в самих углеродных структурах и др. Это требует дополнительного изучения.

Общеизвестным способом изучения структуры углерода является рамановская спектроско-

пия [34, 35]. Спектры комбинационного рассеяния порошков шунгита имеют характерный для рентгеноаморфных углеродных материалов вид (рис. 2) [35–37]. В спектрах видны две основные полосы: полоса G при $\sim 1600 \text{ см}^{-1}$ и полоса D при $\sim 1310\text{--}1315 \text{ см}^{-1}$. Первая из них связана с колебаниями атомов углерода в графеновых структурах (sp^2 -связи). Появление полосы D связано с дефектностью кристаллической решетки, т.е. разупорядоченностью структуры углерода, в том числе, за счет появления различного рода дефектов [38]. Поэтому в качестве основной характеристики для оценки степени упорядоченности структуры различных sp^2 углеродных материалов (оксида графена, стеклоуглерода, шунгита, сажи и др.) используют соотношение интенсивностей D- и G-полос. В настоящем исследовании подобный анализ для шунгитов различных месторождений также был выполнен. Расчет производился по относительной высоте наблюдаемых пиков (за вычетом фона) без разложения контуров на отдельные полосы методом компьютерной декомпозиции. Из полученных результатов и проведенных расчетов (рис. 2, табл. 3) видно, что изученные образцы имеют существенные различия по структуре углерода. Так, самый упорядо-

ченный углерод содержится в пробе из месторождения Березовец (№ 4) (с большим отрывом), самый неупорядоченный характерен для образцов из Зажогоино (№ 6 и 7). Это, в целом, неплохо соотносится с результатами ДСК. Кроме того, помимо различий в соотношении интенсивностей, изменяются форма полос и их ширина. Например, в образце № 4 можно видеть существенное уширение полосы D и появление плеча к ней в районе $\sim 1150\text{--}1160 \text{ см}^{-1}$ (по разным исследованиям – полоса T [38] или D* [37]), причину возникновения которого объясняют по-разному. В целом, существует определенная зависимость: чем более разупорядочена структура углерода, тем шире линия G. С учетом того, что эта полоса связана с колебаниями атомов углерода в графеновых структурах, можно предположить, что ширина G-полосы определяется числом слоев графена в турбостратной (неориентированное наложение графеновых слоев) структуре шунгитового углерода. В этом случае, частицы достаточно упорядоченного углерода из образцов № 4 (Березовец) и № 5 (Чеболакша) несколько меньше, чем в пробах № 3 (Тетюгино), № 6 и № 7 (Зажогоино), углерод в которых менее упорядочен (табл. 3).

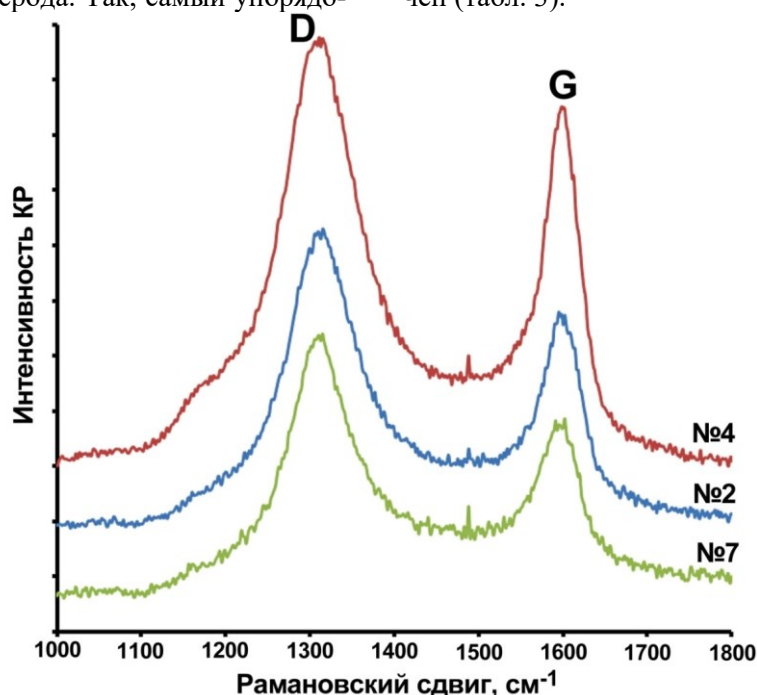


Рис. 2. Спектры КР порошков шунгита различных месторождений (на рисунке приведены самые представительные кривые)

Линия D, по сути, определяет аморфное состояние углерода, а потому, связана с дефектностью слоев графена: деформации, интеркалирование примесей в пограничные слои графеновых пачек [36]. Последнее происходит потому, что углерод на краях графеновых слоев имеют свободные валентности, которые могут присоединять такие атомы, как H, Si, Fe, K, N, S, Cl и т.д.,

либо углеродные атомы, входящие как в отдельные плоские слои, расположенные вне пачек, так и в атомарные цепи. Заполнение промежутков между графеновыми пачками, углеродными цепями и слоями способствует цементированию структуры и формированию турбостратной (неупорядоченной) фазы углерода в шунгите [36,

39]. Эти положения в целом согласуются с результатами определения элементного состава частиц шунгитового углерода (табл. 4). При этом принято допущение, что инородные атомы S и Cl входят в структуру углерода, а примеси в виде SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , MgO , Fe_2O_3 и т.д. являются составляющими минеральной части шунгита. Количество этих минеральных примесей, вероятно, связано с распределением углерода в объеме шунгитового порошка: чем больше примесей, тем более однороден порошок по составу. Из таблицы 4 видно, что наиболее «турбостратный» уг-

лерод по данным КР в пробах Зажогинского месторождения (№ 6 и 7) содержит наименьшее количество примесей S и Cl (0,09 % и 0,05 % соответственно). И, наоборот, в наиболее упорядоченных образцах их количество наибольшее: № 4 (Березовец) – 0,37 %, № 2 (Шуньга) – 0,25 %. Эти же пробы имеют самые широкие профили D-полосы на КР-спектрах. Сюда же хорошо ложится достаточно разупорядоченный образец из Тетюгино (№ 3) – он имеет достаточно широкую полосу D ($\text{FWHM}=96 \text{ см}^{-1}$) при высоком содержании примесей S и Cl в структуре углерода (0,21 %).

Таблица 3

Характеристики КР-линий порошков шунгита различных месторождений

Образец	Линия D FWHM*, см^{-1}	Линия G FWHM, см^{-1}	$R=I_D/I_G$
1	93	56	1,49
2	97	59	1,44
3	96	68	1,54
4	107	52	1,19
5	88	51	1,45
6	88	63	1,69
7	92	65	1,62

* FWHM – ширина линии на полувысоте

Таблица 4

Элементный состав частиц шунгитового углерода в порошках шунгита, определенный методом ЭДС

Компоненты	Содержание, ат.%, в пробе						
	1	2	3	4	5	6	7
C	95,02	90,92	89,33	97,24	93,81	95,44	86,85
O*	4,57	6,45	3,22	2,39	4,46	3,79	7,03
Соотношение O/C	0,048	0,071	0,036	0,024	0,048	0,040	0,081
S	0,10	0,19	0,17	0,25	0,10	0,06	0,05
Cl	–	0,06	0,04	0,12	0,06	0,03	–
Примеси	0,30	2,38	7,23	–	1,56	0,68	6,07

* Количество кислорода в частицах шунгитового углерода рассчитывалось за вычетом в стехиометрической пропорции кислорода, содержащегося в примесях (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , MgO и т.д.)

Можно утверждать, что углерод в составе шунгитов различных месторождений сильно отличается по структуре с точки зрения упорядоченности графеновых слоев, их дефектности и содержания примесей. Этим можно объяснить различную морфологию углеродных фаз на СЭМ-изображениях между менее упорядоченным углеродом в составе проб Зажогинского месторождения (№ 6 и 7) и более упорядоченным в составе образцов из Максово (№ 1) и Шуньги (№ 2) (рис. 3). Описанные особенности структуры углерода в различных точках географической локализации являются следствием условий формирования углеродистого вещества в ходе процессов карбонизации и графитизации [36].

Известно, что примеси в составе углерода влияют на температуру фазовых переходов: в

частности, они способны катализировать термическое разложение [39–41]. Это неплохо соотносится для проб № 2–4, содержащих наибольшее количество S и Cl. Они же имеют наименьшие температуры начала выгорания углерода и достаточно низкие пиковые температуры экзотермического эффекта (для проб № 3 (Тетюгино) и № 4 (Березовец)) по данным ДСК (табл. 2). Для образцов № 1 (Максово) и № 6 (Зажогин-1) все наоборот. Можно предположить, что интеркалирование примесей в пограничные слои графеновых пачек может не только ускорять деструктивные процессы при нагревании, но и влиять на химическую активность и другие химические свойства углеродсодержащего порошка.

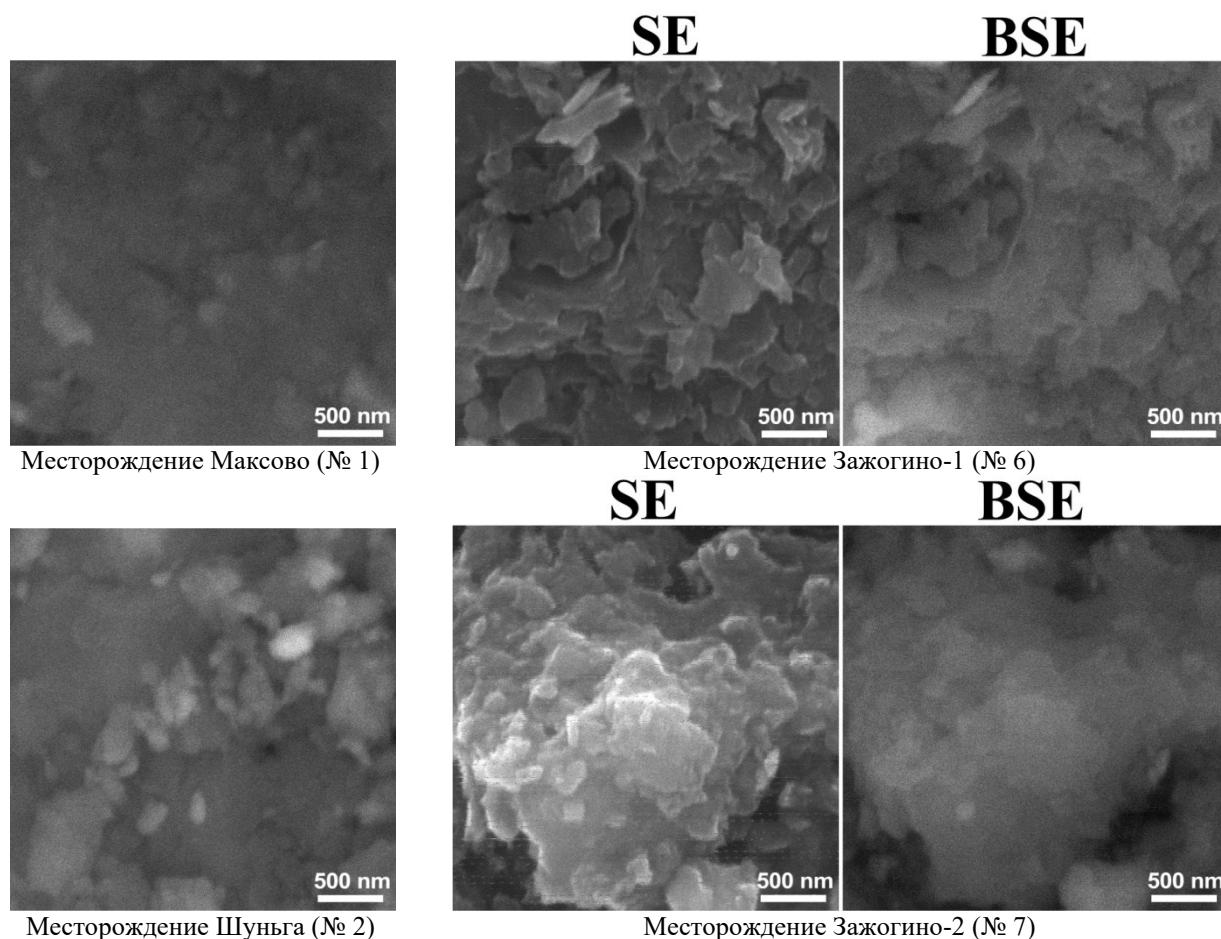


Рис. 3. СЭМ-изображения частиц углерода в порошках шунгита различных месторождений (для № 1 и 2 представлены BSE-изображения)

Присутствие кислорода в углеродных частицах определяет наличие некоторого количества оксида графена в общей массе турбостратной структуры. Кислород в структуре шунгитового углерода может входить в состав гидроксильных, карбонильных, карбоксильных, фенольных и других групп, что отмечается исследователями для подобных углеродных материалов (технического углерода, оксида графена, активированного угля) [37, 42, 43]. Тип функциональных групп и их количество может также определять химическую активность порошков. Кроме того, как отмечается в [44], функционализация поверхности частиц графена способна повысить коллоидную стабильность битума, поскольку при введении таких углеродных фаз (графена или восстановленного оксида графена) в жидкую органическую систему напрямую происходит адсорбция агрегатов асфальтенов битума (асфальтены+смолы) на поверхности производных графена (оксиде графена) с образованием агломератов, что приводит к расслоению фаз.

3. Физические свойства порошков шунгита

Особенности состава исследованных образцов шунгита влияют на физические свойства по-

лучаемых порошков. Поскольку материалы обладают большой площадью поверхности, в первую очередь, наличие шунгитового углерода скажется на величине удельной поверхности, измеренной методом БЭТ (рис. 4). Поскольку графитоподобные структуры очень малы, то чем больше шунгитового углерода содержится в материале, тем больше будут показатели площади поверхности (рис. 4, а). Однако для образцов из Максово (№ 1) и Зажогоино (№ 6 и 7), содержащих примерно одинаковое количество углерода (~32 мас. %), удельная поверхность практически линейно возрастает по мере снижения степени упорядоченности углерода. Вообще, удельная поверхность по БЭТ неплохо коррелирует с соотношением интенсивностей основных линий рамановских спектров для всех исследованных образцов в случае линейного приближения ($R^2=0,8398$) (рис. 4, б).

Таким образом, чем больше углерода содержится в шунгите и чем более разупорядочена его структура, тем выше удельная поверхность по адсорбции азота. Исходя из этого, можно предположить, что соответствующее влияние это окажет на свойства битума при введении в него шунгитовых порошков.

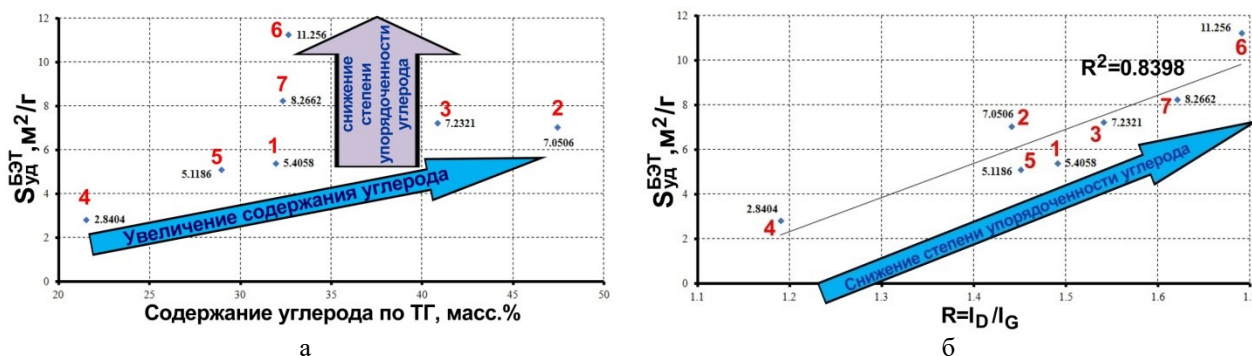


Рис. 4. Влияние содержания углерода в составе шунгита (а) и степени упорядоченности углерода (б) на удельную поверхность порошков, измеренную методом БЭТ

4. Структурообразование полимерно-битумных вяжущих с использованием порошков шунгита различных месторождений

При смешении разнородных компонентов при создании модифицированного полимерно-битумного вяжущего важнейшим показателем будет являться стабильность формируемой структуры. В случае рассматриваемых в статье систем полимерно-битумных вяжущих, модифицированных твердыми частицами шунгитового порошка, важна когезионная прочность, которая может дать информацию о характере и механизме взаимодействия органического вяжущего, представляющего собой смесь различных углеводородов, и уникального природного композиционного материала, состоящего из углерода и минеральной части. Полученные результаты на модифицированных вяжущих показывают схожую с выше представленными зависимость: с увеличением удельной поверхности и, следовательно, разупорядоченности структуры углерода, усилие при разрыве также возрастает (рис. 5). Необходимо отметить, что эффект улучшения относительно исходного ПБВ есть при использовании всех образцов шунгита, что может свидетельствовать о перспективности выбранной модификации. То есть, при введении в битум твердой фазы углерод-минеральных агрегатов из частиц имеет место модифицирование, приводящее к формированию однородной системы из органического вяжущего, полимера и шунгита с большей прочностью на разрыв, чем композиционное вяжущее на чистом полимере. Наибольшее влияние оказывают пробы Зажоговского месторождения № 6 (увеличение на 28,03 % относительно ПБВ) и № 7 (31,84 %), содержащие наиболее «турбостратный» (неупорядоченный) углерод с малым количеством интеркалированных в графеновые пачки примесей. Остальные образцы дают существенно меньший прирост когезионной прочности (от 19 до 25 % относительно ПБВ).

Как уже отмечалось, модифицирование происходит при использовании всех вводимых по-

рошков, однако эффективность разнится. Логично предположить, что активным модификатором в составе шунгита будет являться углерод, который представляет собой нанокристаллическую графитоподобную составляющую. Механизм влияния этой фазы на битум будет схож с процессами структурообразования нефти в присутствии графеновых наночастиц [45]. Может происходить формирование новых устойчивых структур, образованных с участием коллоидных частиц (нефтяные дисперсные частицы), за счет переключения связей углеводородов, разрыхлением исходных углеводородных компактных скоплений и созданием новых, но уже с участием графеновых слоев или пачек. Применительно к шунгитовому углероду эффективность его введения в нефтяную систему будет тем выше, чем легче и в большей степени будет происходить разрушение крупных агрегатов и агломератов частиц углерода с распределением в объеме модифицированной смеси ПБВ фрагментов из графеновых пачек и отдельных слоев. Исходя из этого, наиболее перспективными представляются образцы, содержащие углерод с наименьшим размером частиц и с наибольшей степенью разупорядоченности. Это справедливо для образцов из Зажогово (№ 6 и 7). Они были отнесены к наполнителям с «высоким модифицирующим эффектом» (рис. 5). В остальных пробах модифицирующее действие существенно меньше. Даже порошки № 4 (Березовец) и № 5 (Чеболакша), для которых отмечался меньший размер частиц углерода по сравнению со всеми другими, обеспечивают меньший прирост когезионной прочности вследствие большей упорядоченности углеродных структур и существенно меньшим их содержанием в вводимом наполнителе (особенно для образца № 4 – 21,5 мас. % против ~32,5 мас. % у образцов № 6 и 7). То же характерно и для образца из Шуныги (№ 2) с существенно большим количеством углеродной составляющей. По оказываемому влиянию пробы из месторождений Максово (№ 1) и Березовец (№ 4) были

отнесены к наполнителям со «средним модифицирующим эффектом» (увеличение усилия на разрыв на 24,84 %), а образцы месторождений Шуньга (№ 2), Тетюгино (№ 3) и Чеболакша (№ 5) – к модификаторам с «низким эффектом» (увеличение усилия на разрыв на 19,11–22,29 %) (рис. 5). Снижение модифицирующего эффекта

углеродной составляющей шунгита способствует тому, что такие образцы можно охарактеризовать в большей степени как обычные минеральные порошки, наполняющие битум. Соответственно, чем меньше модифицирующее действие, тем более явно проявляется простой механизм наполнения органической матрицы.

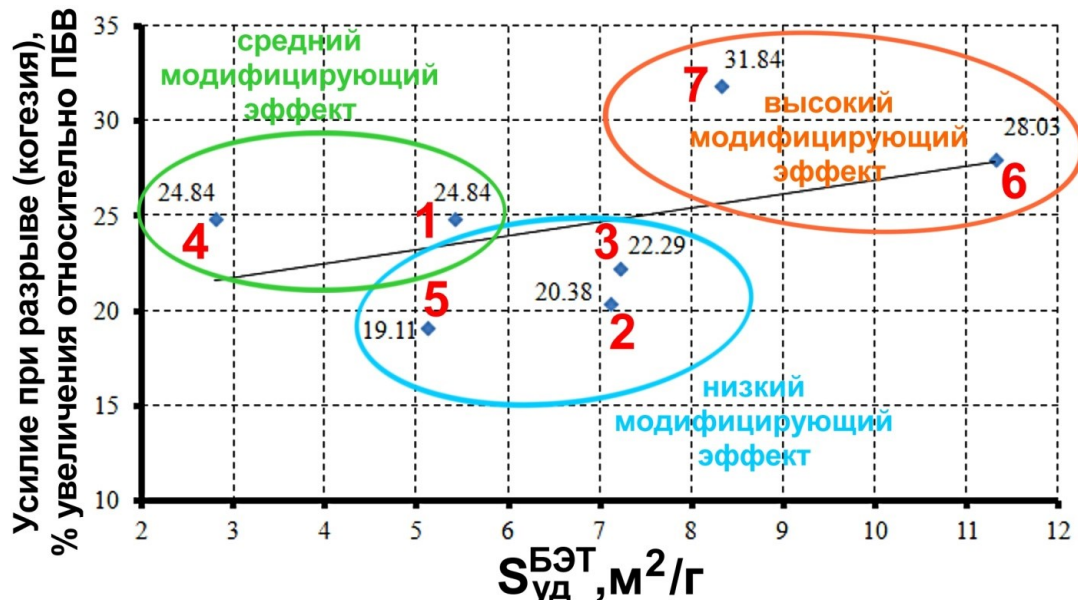


Рис. 5. Взаимосвязь между удельной поверхностью шунгитовых порошков, измеренной методом БЭТ, и усилием при разрыве модифицированных вяжущих

Изучение степени структурирования вяжущей системы в присутствии углерод-минеральных порошков дает схожие результаты. Модифицирующее действие разупорядоченного углерода в образцах Зажогинского месторождения (№ 6 и 7) проявляется немного сильнее, чем во всех прочих образцах (рис. 6 и 7). Однако разница между этими наполнителями с «высоким модифицирующим эффектом» и порошками «средней эффективности» (№ 1 (Максово) и № 4 (Березовец)) здесь намного ниже, зато увеличивается разрыв между «средней группой» и пробами с «низким модифицирующим эффектом». В эксперименте на коническую пластометрию минеральные частицы твердой фазы способствуют увеличению предельного напряжения сдвига даже в порошках со «средним модифицирующим эффектом» (рис. 6). В этом случае возможно проявление «эффекта наполнения» при структурировании, обусловленное присутствием в пробах значительного количества как мельчайших (размером до 5 мкм), так и достаточно крупных частиц (размером до 50–70 мкм), что определяет широкое распределение частиц по размерам (для этих проб характерен наибольший размах распределения) и наличие трех мод на кривой (графики распределения частиц по размерам в настоящей статье не приведены). Для шунгитовых наполнителей из Шуньги (№ 2) и Тетюгино (№ 3) (низкий

модифицирующий эффект) кроме влияния дисперсности на реологическом поведении сказывается наименьшая концентрация «наполняющей» минеральной части и высокая упорядоченность углеродных структур.

Температура размягчения также характеризует структурированную систему органического вяжущего, а именно ее переход из твердого состояния в пластичное. Чем больше будет в модифицированном вяжущем структурированных состояний, образуемых благодаря графеновым частицам или более крупным минеральным зернам, и чем более однородна будет при этом система, тем сильнее будет изменяться температура размягчения относительно исходного ПБВ. Полученные результаты подтверждают «высокий модифицирующий эффект» разупорядоченного шунгитового углерода из образцов Зажогинского месторождения (№ 6 и 7) (рис. 7).

Результаты эксперимента по испытанию модифицированных шунгитовыми порошками полимерно-битумных вяжущих доказывают стабильность и однородность формируемой структурированной дисперсной системы. При этом независимые испытания по измерению когезионной прочности, предельного напряжения сдвига и температуры размягчения показывают высокую сходимость между собой с получением высоких коэффициентов корреляции в линейном приближении (порядка 0,95) (рис. 8).

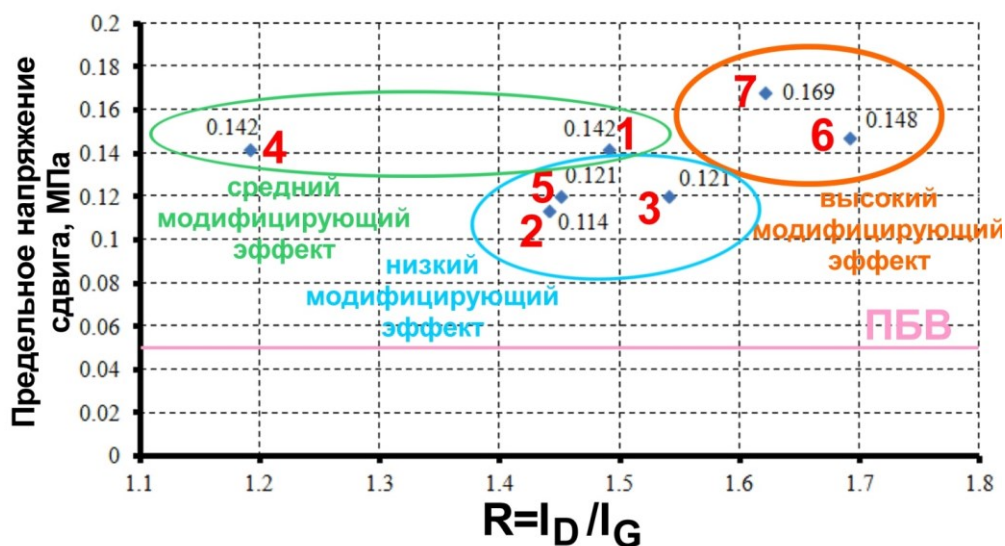


Рис. 6. Взаимосвязь между степенью упорядоченности углерода в шунгите и предельным напряжением сдвига модифицированных вяжущих, определенного методом конической пластометрии

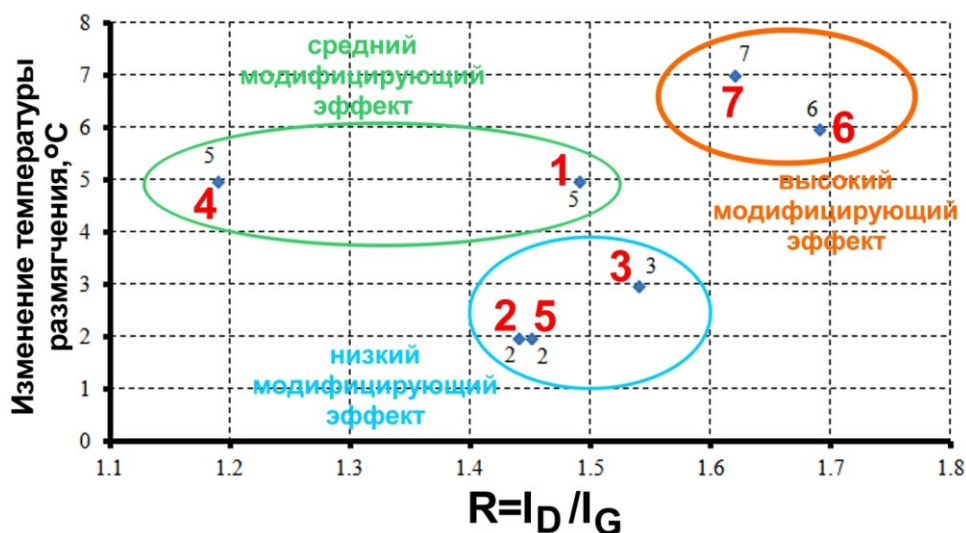


Рис. 7. Взаимосвязь между степенью упорядоченности углерода в шунгите и изменением температуры размягчения ПБВ при введении шунгитового порошка

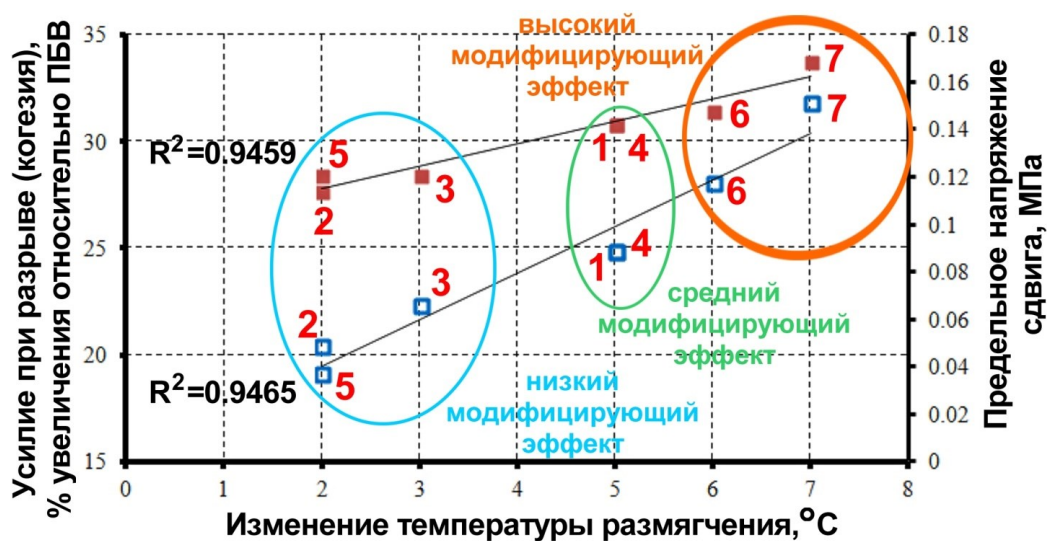


Рис. 8. Взаимосвязь между характеристиками ПБВ при введении шунгитового порошка: изменением температуры размягчения – величиной когезии (полые квадраты), изменением температуры размягчения – предельным напряжением сдвига, определенным методом конической пластометрии (закрашенные квадраты)

Таким образом, можно констатировать, что углерод в составе шунгита является активным модифицирующим компонентом битумного вяжущего, эффективность действия которого зависит от концентрации и степени упорядоченности графитоподобных (sp^2 -углеродных) структур, а также, возможно, их химической и адсорбционной активности. Проверка последнего является задачей для будущих исследований.

Выводы. Проведенными комплексными исследованиями углеродного компонента шунгитовых пород, как важнейшей составляющей этих природных композиционных материалов, определяющей многие их уникальные свойства, установлено, что образцы из семи месторождений Карелии содержат различное количество шунгитового углерода, характеризующегося разной степенью упорядоченности графитоподобных (sp^2 -углеродных) структур в зависимости от места отбора. Наиболее разупорядоченный (турбостратный) углерод обнаружен в пробах Зажогинского месторождения (№ 6 и 7), самый упорядоченный содержится в пробе из месторождения Березовец (№ 4). Также выявлены различия в размере глобул шунгитового углерода и содержании примесей.

Обнаруженные отличия в упорядоченности графеновых слоев и их дефектности влияют на величину удельной поверхности, измеренной методом БЭТ, и эффект от модифицирования при введении шунгитовых порошков в полимерно-битумное вяжущее. Чем более разупорядочена структура углерода, тем выше удельная поверхность порошка, когезионная прочность модифицированного вяжущего и, следовательно, более однородна и структурирована битумная матрица, усиленная полимером. Наиболее активными наполнителями с высоким модифицирующим эффектом являются образцы Зажогинского месторождения, улучшающие в максимальной степени показатели температуры размягчения, усилия при разрыве и предельного напряжения сдвига, определенного методом конической пластометрии.

Благодарность. Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Игнатъев А.А. Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. №1(63). С. 14–30. DOI: 10.52409/20731523_2023_1_14
2. Zhu J., Birgisson B., Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges // European Polymer Journal. 2014. Vol. 54. Pp. 18–38. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005
3. Wu W., Cavalli M.C., Jiang W., Kringos N. Differing perspectives on the use of high-content SBS polymer-modified bitumen // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. 134433. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134433
4. Mumtaz N., Li Y., Artiaga R., Farooq Z., Mumtaz A., Guo Q., Nisa F.U. Fillers and methods to improve the effective (out-plane) thermal conductivity of polymeric thermal interface materials – A review // Heliyon. 2024. Vol. 10(3). e25381. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25381
5. Yadav R., Singh M., Shekhawat D., Lee S.Y., Park S.J. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A Review // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2023. Vol. 175. 107775. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107775
6. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Павленко З.В., Ястребинская А.В., Черкашина Н.И. Нанодисперсные металлоорганосилоксановые наполнители полимеров // Нанотехнологии в строительстве. 2016. №8(4). С. 113–130. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-4-113-130
7. Luo L., Awed A.M., Oeser M., Liu P. Mechanisms of interfacial load transfer in the fracture process of carbon nanotube-reinforced bitumen composites // Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 290. 109521. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109521
8. Li Z., Yu X., Liang Y., Wu S. Carbon nanomaterials for enhancing the thermal, physical and rheological properties of asphalt binders // Materials. 2021. Vol. 14(10). 2585. DOI: 10.3390/ma14102585
9. Ul Haq M.F., Anwar W., Ahmad N., Khitab A., Jamal M., Hllssan S. Carbon nanotubes and their use for asphalt binder modification: A review // Emerging Materials Research. 2020. №9(2). Pp. 234–247. DOI: 10.1680/jemmr.18.00115
10. Loise V., Calandra P., Policicchio A., Madeo L., Oliviero Rossi C., Porto M., Abe A., Agostino R.G., Caputo P. The efficiency of bio-char as bitumen modifier // Heliyon. 2024. Vol. 10(1). e23192. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e23192
11. Беляев К.В., Чулкова И.Л. Модификация битума техническим углеродом // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. №4(16). С. 472–485.
12. Zhao S., Huang B., Ye X.P., Shu X., Jia X. Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product // Fuel. 2014. Vol. 133. Pp. 52–62. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.05.002

13. Moretti L., Fabrizi N., Fiore N., D'andrea A. Mechanical characteristics of graphene nanoplatelets-modified asphalt mixes: A comparison with polymer-and not-modified asphalt mixes // *Materials*. 2021. Vol. 14(9). 2434. DOI: 10.3390/ma14092434
14. Amirbayev Y., Yelshibayev A., Nugmanova A. Characterization of asphalt bitumens and asphalt concretes modified with carbon powder // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01554. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01554
15. Воробьева А.А., Емельянычева Е.А., Абдуллин А.И. Исследование возможности использования технического углерода в качестве модификатора нефтяного битума // *Вестник технологического университета*. 2018. №10(21). С. 67–70.
16. Feng Z.G., Rao W.Y., Chen C., Tian B., Li X.J., Li P.L., Guo Q.L. Performance evaluation of bitumen modified with pyrolysis carbon black made from waste tyres // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 111. Pp. 495–501. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.143
17. Gargiulo V., Alfe M., Ruoppolo G., Cammarota F., Rossi C.O., Loise V., Porto M., Calandra P., Pochylski M., Gapinski J., Caputo P. How char from waste pyrolysis can improve bitumen characteristics and induce anti-aging effects // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 676. 132199. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.132199
18. Таров Д.В., Евлахин Д.А., Зеленин А.Д., Столяров Р.А., Ягубов В.С., Меметов Н.Р., Меметова А.Е., Чапаксов Н.А., Герасимова А.В. Электропроводящие нанокмпозиционные битумные вяжущие, содержащие углеродные нанотрубки и многослойный графен // *Frontier Materials & Technologies*. 2023. №2. С. 131–139. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-5
19. Wang F., Zhu H., Li Y., Gu D., Gao Y., Feng J., Shu B., Li C., Wu S., Liu Q., Xu Z. Microwave heating mechanism and Self-healing performance of scrap tire pyrolysis carbon black modified bitumen // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 341. 127873. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127873
20. Хромушин В.А., Честнова Т.В., Платонов В.В., Хадарцев А.А., Киреев С.С. Шунгиты, как природная нанотехнология (обзор литературы) // *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание*. 2014. №1. С. 162. DOI: 10.12737/7346
21. Голубев Е.А., Антонен И.В., Щеглов В.И. Модельные представления микроструктуры, электропроводящих и СВЧ-свойств шунгитов: монография. Сыктывкар: Изд-во СГУ им. Питирима Сорокина, 2017. 148 с.
22. Ковалевский В.В. Шунгит или высший антраксолит? // *Записки Российского минералогического общества*. 2009. №5(138). С. 97–105.
23. Резников В.А., Полеховский Ю.С., Холмогоров В.Е. Концентрация и распределение фуллеренов в заонежских шунгитах // *Тез. междунар. симп. «Углеродсодержащие формации в геологической истории»*. Петрозаводск, 1998. 71 с.
24. Хачатуров А.А., Потапов Е.Э., Колесов В.В., Фионов А.С., Бобров А.П., Смаль В.А., Прут Э.В., Шевченко В.Г., Тикунова И.В. Изучение электрофизических и акустических свойств полимерных композиционных материалов на основе СКЭПТ и шунгита // *Каучук и резина*. 2018. №2(77). С. 96–101.
25. Yadykina V.V., Vyrodova K.S., Potapov E.E. Efficiency of using shungite filler for modifying organic binder // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012025
26. Дейнес Ю.Е. Литохимическая характеристика шунгитов месторождения Шуньга // «Науки о Земле: задачи молодых»: материалы 71-й Всероссийской научной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Карельский научный центр РАН, Петрозаводск (16-17 апреля 2019 г.). 2019. С. 8–12.
27. Ключникова Н.В., Пискарева А.О., Уранов К.А., Гордеев С.А., Генев И. Влияние шунгита на эксплуатационные свойства полимерного композиционного материала // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова* 2020. №2. С. 96–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-96-105
28. Подольский Вл.П., Волков В.В., Кукина О.Б., Андреев А.В. Обоснование возможности применения шунгита в качестве эффективного радиопоглощающего материала // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. №1(65). С. 69–75. DOI: 10.36622/VSTU.2022.65.1.006
29. Пыкин А.А., Лукутцова Н.П., Костюченко Г.В. К вопросу о повышении свойств мелкозернистого бетона микро- и нанодисперсными добавками на основе шунгита // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. №2. С. 16–20.
30. Zaidenberg A.Z., Rozhkova N.N., Kovalevski V.V., Tupolev A.G. Shungite carbon and fullerenes // *Fullerene Science and Technology*. 1998. Vol. 3(6). Pp. 511–517. DOI: 10.1080/10641229809350218
31. Садовничий Р.В., Михайлина А.А., Рожкова Н.Н., Инина И.С. Морфологические и структурные особенности кварца шунгитовых пород Максовской залежи // *Труды Карельского*

научного центра РАН. 2016. №2. С. 73–88. DOI: 10.17076/geo126

32. Хабибуллина И.А., Ситников Н.Н., Казаков В.А., Сигалаев С.К. Синхронный термический анализ и спектроскопия комбинационного рассеяния света как взаимодополняющие методы диагностики аллотропных форм углерода // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2016. №8(59). С. 34–39.

33. Савельева В.Б., Пономарчук В.А., Базарова Е.П. Изотопный состав углерода графита в глубоко-метаморфизованных комплексах Шарыжалгайского краевого выступа Сибирской платформы в районе Байкальского и Китойского месторождений // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011. №2(39). С. 98–110.

34. Голубев Е.А., Шека Е.Ф. Особенности молекулярного характера колебательных спектров аморфного sp^2 углерода: ИК поглощение и комбинационное рассеяние // 14 Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» (Москва, г. Троицк, 7-9 июня 2022 г): сборник научных трудов. 2022. С. 59–60.

35. Силаев В.И., Лютов В.П., Петровский В.А., Хазов А.Ф. Опыт исследований природных углеродистых веществ и некоторых их синтетических аналогов методом рамановской спектроскопии // Мінералогічний журнал. 2013. №3(35). С. 33–47.

36. Голубев Е.А. Электрофизические свойства и структурные особенности шунгита (природного наноструктурированного углерода) // Физика твердого тела. 2013. №5(55). С. 995–1002.

37. López-Díaz D., López Holgado M., García-Fierro J.L., Velázquez M.M. Evolution of the raman spectrum with the chemical composition of graphene oxide // Journal of Physical Chemistry C. 2017. Vol. 121. Pp. 20489–20497. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b06236

38. Букалов С.С., Михалицын Л.А., Зубавичус Я.В., Лейтес Л.А., Новиков Ю.Н. Исследование строения графитов и некоторых других sp^2

углеродных материалов методом микро-спектроскопии КР и рентгеновской дифрактометрии // Российский химический журнал. 2006. №1(50). С. 83–91.

39. Бухаркина Т.В., Дигуров Н.Г. Химия природных энергоносителей и углеродных материалов: учебное пособие. РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1999. 195 с.

40. Лопанов А.Н., Фанина Е.А., Нестерова Н.В. Дифференциально-сканирующая калориметрия графита и активированного угля в аргоне // Химия твердого топлива. 2021. №2. С. 42–46. DOI: 10.31857/S0023117721020055

41. Хасков М.А. Термопорометрия и окислительный термический анализ при исследовании углеродных матриц // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2023. №10(66). С. 24–31. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.1y

42. Sheka E.F., Natkaniec I., Ipatova E.U., Golubev Y.A., Kabachkov E.N., Popova V.A. Heteroatom necklaces of sp^2 amorphous carbons. XPS supported INS and DRIFT spectroscopy // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2020. Vol. 12(28). Pp. 1010–1029. DOI: 10.1080/1536383X.2020.1794849

43. Liu Y., Liu X., Dong W., Zhang L., Kong Q., Wang W. Efficient adsorption of sulfamethazine onto modified activated carbon: A plausible adsorption mechanism // Scientific Reports. 2017. Vol. 7(1). Pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41598-017-12805-6

44. Jansson H., Lam P., Swenson J. A sustainable functionalization strategy to improving the material properties of bitumen by incorporating graphene // Next Materials. 2024. Vol. 4. 100205. DOI: 10.1016/j.nxmte.2024.100205

45. Шабиев Ф.К., Пахаруков Ю.В., Сафаргалиев Р.Ф., Ездин Б.С., Васильев С.А. Снижение вязкости нефти с добавлением графеновых нанопластинок // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. №3(8). С. 106–125. DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-106-125

Информация об авторах

Лебедев Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: michael11987@yandex.ru. Национальный исследовательский Томский государственный университет. Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, д. 36. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ядыкина Валентина Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: vvya53@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Выродова Кристина Сергеевна, аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина. E-mail: vyrodova.christina@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.05.2024 г.

© Лебедев М.С., Ядыкина В.В., Выродова К.С., 2024

^{1,2,*}**Lebedev M.S.,²Yadykina V.V.,²Vyrodova K.S.**

¹National Research Tomsk State University

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: michaelL1987@yandex.ru

EFFECT OF COMPOSITION PECULIARITIES OF SHUNGITE FROM VARIOUS DEPOSITS ON STRUCTURE FORMATION OF POLYMER MODIFIED BITUMEN BINDER

Abstract. For reduction the amount of expensive polymers and improving the technological, physico-mechanical, thermophysical and other properties of road materials fillers are introduced into polymer modified bitumen binders (PBB). Therefore, in recent years the interest in natural materials that are similar in composition and have comparable characteristics to synthetic products has been increased. In relation to graphene structures used to modify bitumen and polymers, shungite is seems to be a good alternative, the rock that is essentially a composite material from mixture of shungite carbon and mineral phases. When shungite powder using as PBB modifier the distinctive features of the shungite composition should have a positive effect on the structuring of a bitumen matrix in the presence of a polymer. Since the most important structural component of the rock is carbon, the purpose of this work is to study the effect of shungite carbon from rocks of various deposits on the structure formation of the polymer modified bitumen binder. A set of studies (differential scanning calorimetry, Raman spectroscopy, energy dispersive spectroscopy based on a scanning electron microscope) has established that carbon from samples from seven deposits of Karelia is characterized by varying degree of ordering of graphite-like (sp^2 -carbon) structures depending on the sampling location. An increase in the amount of carbon in the composition of shungite powder and a decrease in the degree of ordering of its structure determine higher values of the specific surface area and a greater effect from modification when adding fillers into the polymer modified bitumen binder. Samples from the Zazhoginsky deposit are the most active fillers with a high modifying effect, which maximally improve the cohesive strength of the composite organic binder and structure the system by the best way. The powders from rocks from other deposits also have the positive effect relative to the base PBB, but with less efficiency. All this indicates the prospects of the proposed modification.

Keywords: shungite, carbon, degree of structure order, polymer modified bitumen binder, modifying effect.

REFERENCES

1. Ignatyev A.A. Additives in asphalt concrete. Literature review [Dobavki v asfal'tobeton. Obzor literatury]. News KSUAE. 2023. No. 1(63). Pp. 14–30. DOI: 10.52409/20731523_2023_1_14 (rus)
2. Zhu J., Birgisson B., Kringos N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. European Polymer Journal. 2014. Vol. 54. Pp. 18–38. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005
3. Wu W., Cavalli M.C., Jiang W., Kringos N. Differing perspectives on the use of high-content SBS polymer-modified bitumen. Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. 134433. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134433
4. Mumtaz N., Li Y., Artiaga R., Farooq Z., Mumtaz A., Guo Q., Nisa F.U. Fillers and methods to improve the effective (out-plane) thermal conductivity of polymeric thermal interface materials – A review. Heliyon. 2024. Vol. 10. Iss. 3. e25381. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25381
5. Yadav R., Singh M., Shekhawat D., Lee S.Y., Park S.J. The role of fillers to enhance the mechanical, thermal, and wear characteristics of polymer composite materials: A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2023. Vol. 175. 107775. DOI: 10.1016/j.compositesa.2023.107775
6. Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Pavlenko Z.V., Yastrebinskaya A.V., Cherkashina N.I. Nanodisperse metalloorganosiloxane fillers of polymers [Nanodispersnye metalloorganosiloksanye napolniteli polimerov]. Nanotechnologies in Construction. 2016. Vol. 8. No. 4. Pp. 113–130. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-4-113-130 (rus)
7. Luo L., Awed A.M., Oeser M., Liu P. Mechanisms of interfacial load transfer in the fracture process of carbon nanotube-reinforced bitumen

- composites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023. Vol. 290. 109521. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2023.109521
8. Li Z., Yu X., Liang Y., Wu S. Carbon nanomaterials for enhancing the thermal, physical and rheological properties of asphalt binders. *Materials*. 2021. Vol. 14. Is. 10. 2585. DOI: 10.3390/ma14102585
9. Ul Haq M.F., Anwar W., Ahmad N., Khitab A., Jamal M., Hillssan S. Carbon nanotubes and their use for asphalt binder modification: A review. *Emerging Materials Research*. 2020. Vol. 9. Is. 2. Pp. 234–247. DOI: 10.1680/jemmr.18.00115
10. Loise V., Calandra P., Policicchio A., Madeo L., Oliviero Rossi C., Porto M., Abe A., Agostino R.G., Caputo P. The efficiency of bio-char as bitumen modifier. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Is. 1. e23192. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e23192
11. Belyaev K.V., Chulkova I.L. Carbon modification of bitumen [Modifikaciya bituma tekhnicheskim uglerodom]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. Vol. 16. No. 4. Pp. 472–485. (rus)
12. Zhao S., Huang B., Ye X.P., Shu X., Jia X. Utilizing bio-char as a bio-modifier for asphalt cement: A sustainable application of bio-fuel by-product. *Fuel*. 2014. Vol. 133. Pp. 52–62. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.05.002
13. Moretti L., Fabrizi N., Fiore N., D'andrea A. Mechanical characteristics of graphene nanoplatelets-modified asphalt mixes: A comparison with polymer-and not-modified asphalt mixes. *Materials*. 2021. Vol. 14. Is. 9. 2434. DOI: 10.3390/ma14092434
14. Amirbayev Y., Yelshibayev A., Nugmanova A. Characterization of asphalt bitumens and asphalt concretes modified with carbon powder. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01554. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01554
15. Vorobeva A.A., Emelyanycheva E.A., Abdullin A.I. Study of carbon black usability as a bitumen modifier [Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnicheskogo ugleroda v kachestve modifikatora neftyanogo bituma]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018. Vol. 21. Is. 10. Pp. 67–70. (rus)
16. Feng Z.G., Rao W.Y., Chen C., Tian B., Li X.J., Li P.L., Guo Q.L. Performance evaluation of bitumen modified with pyrolysis carbon black made from waste tyres. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 111. Pp. 495–501. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.143
17. Gargiulo V., Alfe M., Ruoppolo G., Cammarota F., Rossi C.O., Loise V., Porto M., Calandra P., Pochylski M., Gapinski J., Caputo P. How char from waste pyrolysis can improve bitumen characteristics and induce anti-aging effects. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 676. 132199. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.132199
18. Tarov D.V., Evlakhin D.A., Zelenin A.D., Stolyarov R.A., Yagubov V.S., Memetov N.R., Memetova A.E., Chapaksov N.A., Gerasimova A.V. Electrically conductive nanocomposite bituminous binders containing carbon nanotubes and multilayer grapheme [Elektroprovodyashchie nanokompozicionnye bitumnye vyazhushchie, sodержashchie uglerodnye nanotrubki i mnogoslojnyj grafen]. *Frontier Materials & Technologies*. 2023. No. 2. Pp. 131–139. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-5 (rus)
19. Wang F., Zhu H., Li Y., Gu D., Gao Y., Feng J., Shu B., Li C., Wu S., Liu Q., Xu Z. Microwave heating mechanism and Self-healing performance of scrap tire pyrolysis carbon black modified bitumen. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 341. 127873. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127873
20. Khromushin V.A., Tchesnova T.V., Platonov V.V., Khadartsev A.A., Kireev S.S. The shungite as natural nanotechnology (literature review) [Shungity, kak prirodnaya nanotekhnologiya (obzor literatury)]. *Journal of New Medical Technologies, eEdition*. 2014. No. 1. Pp. 162. DOI: 10.12737/7346 (rus)
21. Golubev E.A., Antonetz I.V., Shcheglov V.I. Model representations of the microstructure, electrical conductivity and microwave properties of shungites: monograph [Model'nye predstavleniya mikrostruktury, elektroprovodyashchih i SVCh-svoystv shungitov: monografiya]. *Syktvykar: Pitirim Sorokin SyktSU*. 2017, 148 p. (rus)
22. Kovalevsky V.V. Shungite or the higher anthraxolite? [Shungit ili vysshij antraksolit?]. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*. 2009. Vol. 138. Is. 5. Pp. 97–105. (rus)
23. Reznikov V.A., Polekhovskii Yu.S., Kholmogorov V.E. Concentration and distribution of fullerenes in Zaonezhsky shungites [Koncentraciya i raspredelenie fullerenov v zaonezhskih shungitah]. *Tezisy mezhdunarodnogo simpoziuma «Uglerod-soderzhashchie formacii v geologicheskoy istorii»*. Petrozavodsk. 1998. Pp. 71. (rus)
24. Khachaturov A.A., Potapov E.E., Kolesov V.V., Fionov A.S., Bobrov A.P., Smal V.A., Prut E.V., Tikunova I.V. Study of Electrophysical and Acoustic Properties of Polymer Composites Based on EPDM and Shungite [Izuchenie elektrofizicheskikh i akusticheskikh svoystv polimernyh kompozicionnykh materialov na osnove SKEPT i shungita]. *Kauchuk i rezina*. 2018. Vol. 77. No. 2. Pp. 96–101. (rus)
25. Yadykina V.V., Vyrodova K.S., Potapov E.E. Efficiency of using shungite filler for modifying

organic binder. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/945/1/012025

26. Deines Y.E. Lithochemical characteristics of shungites from the Shunga deposit [Litohimicheskaya charakteristika shungitov mestorozhdeniya Shun'ga]. 71 Vserossiyskaya nauchnaya shkola-konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenykh «Nauki o Zemle: zadachi molodyh». Karel'skij nauchnyj centr RAN. Petrozavodsk. 2019. Pp. 8–12. (rus)

27. Klyuchnikova N.V., Piskareva O.A., Urvanov K.A., Gordeev S.A., Genov I. Influence of shungite on performance properties of polymeric composite material [Vliyanie shungita na ekspluatatsionnye svoystva polimernogo kompozitsionnogo materiala]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 2. Pp. 96–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-96-105 (rus)

28. Podolsky V.I., Volkov V.V., Kukina O.B., Andreev A.V. Substantiation of the possibility of using shungite as an effective radio-absorbing material [Obosnovanie vozmozhnosti primeneniya shungita v kachestve effektivnogo radiopogloshchayushchego materiala]. Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury. 2022. No. 1(65). Pp. 69–75. DOI: 10.36622/VSTU.2022.65.1.006 (rus)

29. Pykin A.A., Lukutsova N.P., Kostuchenko G.V. On the issue of increasing the properties of fine-grained concrete with micro- and nano-dispersed additives based on shungite [K voprosu o povyshenii svoystv melkozernistogo betona mikro- i nanodispersnymi dobavkami na osnove shungita]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2011. No. 2. Pp. 16–20. (rus)

30. Zaidenberg A.Z., Rozhkova N.N., Kovalevski V.V., Tupolev A.G. Shungite carbon and fullerenes. Fullerene Science and Technology. 1998. No. 3(6). Pp. 511–517. DOI: 10.1080/10641229809350218

31. Sadovnichii R.V., Mikhaylina A.A., Rozhkova N.N., Inina I.S. The morphological and structural features of quartz of shungite rocks of Maksovo deposit [Morfologicheskie i strukturnye osobennosti kvarca shungitovykh porod Maksovskoy zalezhi]. Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2016. No. 2. Pp. 73–88. DOI: 10.17076/geo126 (rus)

32. Khabibullina I.A., Sitnikov N.N., Kazakov V.A., Sigalaev S.K. Simultaneous thermal analysis and raman spectroscopy as complementary methods of diagnostics of carbon allotropic forms [Sinhronnyj termicheskij analiz i spektroskopiya kombinatsionnogo rasseyaniya sveta kak vzaimodopolnyayushchie metody diagnostiki allotroponykh form ugleroda]. ChemChemTech (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, seriya

khimiya i khimicheskaya tekhnologiya). 2016. Vol. 59. No. 8. Pp. 34–39. (rus)

33. Savelyeva V.B., Ponomarchuk V.A., Bazarova E.P. Isotopic composition of graphitic carbon from deep-metamorphized complexes of the Sharyzhgala edge of the Siberian platform [Izotopnyj sostav ugleroda grafita v glubokometamorfizovannykh kompleksakh Sharyzhgalskogo kraevogo vystupa Sibirskoy platformy v rajone Bajkal'skogo i Kitojskogo mestorozhdenij]. Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sekcii nauk o Zemle RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenij. 2011. No. 2(39). Pp. 98–110. (rus)

34. Golubev E.A., Sheka E.F. Features of the molecular character of the vibrational spectra of amorphous sp^2 carbon: IR absorption and Raman scattering [Osobennosti molekulyarnogo haraktera kolebatel'nykh spektrov amorfnogo sp^2 ugleroda: IK pogloshchenie i kombinatsionnoe rasseyanie]. 14 Mezhdunarodnaya konferenciya «Uglerod: fundamental'nye problemy nauki, materialovedenie, tekhnologiya»: sbornik nauchnykh trudov. Moscow, Troitsk. 2022. Pp. 59–60. (rus)

35. Silaev V.I., Lutoev V.P., Petrovsky V.A., Khazov A.F. Experience of research of natural carbonaceous substances and some their synthetic analogs by raman spectroscopy [Opyt issledovaniy prirodnykh uglerodistykh veshchestv i nekotorykh ih sinteticheskikh analogov metodom ramanovskoy spektroskopii]. Mineralogical Journal (Ukraine). 2013. Vol. 35. No. 3. Pp. 33–47. (rus)

36. Golubev E.A. Electrophysical properties and structural features of shungite (natural nanostructured carbon) [Elektrofizicheskie svoystva i strukturnye osobennosti shungita (prirodnogo nanostrukturirovannogo ugleroda)]. Physics of the solid state. 2013. Vol. 55. No. 5. Pp. 995–1002. (rus)

37. López-Díaz D., López Holgado M., García-Fierro J.L., Velázquez M.M. Evolution of the raman spectrum with the chemical composition of graphene oxide. Journal of Physical Chemistry C. 2017. Vol. 121. Is. 37. Pp. 20489–20497. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b06236

38. Bukalov S.S., Mikhailitsyn L.A., Zubavichus Ya.V., Leites L.A., Novikov Yu.N. Study of the structure of graphites and some other sp^2 carbon materials using Raman microspectroscopy and X-ray diffractometry [Issledovanie stroeniya grafitov i nekotorykh drugikh sp^2 uglerodnykh materialov metodom mikro-spektroskopii KR i rentgenovskoy difraktometrii]. Rossijskij himicheskij zhurnal. 2006. Vol. 50. No. 1. Pp. 83–91. (rus)

39. Bukharkina T.V., Digurov N.G. Chemistry of natural energy carriers and carbon materials: textbook [Himiya prirodnykh energonositelej i uglerodnykh materialov: uchebnoe posobie]. Moscow: D.

Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia. 1999. 195 p. (rus)

40. Lopanov A.N., Fanina E.A., Nesterova N.V. Differential-scanning calorimetry of graphite and activated carbon in argon [Differencial'no-skanniruyushchaya kalorimetriya grafita i aktivirovannogo uglya v argone]. Solid Fuel Chemistry. 2021. No. 2. Pp. 42–46. DOI: 10.31857/S0023117721020055 (rus)

41. Khaskov M.A. Thermoporometry and oxyreductive thermal analysis for study of carbon matrices [Termoporometriya i oksidatel'nyj termicheskiy analiz pri issledovanii uglerodnyh matric]. Chem-ChemTech (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, seriya khimiya i khimicheskaya tekhnologiya). 2023. Vol. 66. No. 10. Pp. 24–31. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.1y (rus)

42. Sheka E.F., Natkaniec I., Ipatova E.U., Golubev Y.A., Kabachkov E.N., Popova V.A. Heteroatom necklaces of sp^2 amorphous carbons. XPS supported INS and DRIFT spectroscopy. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2020. Vol.

28. No. 12. Pp. 1010–1029. DOI: 10.1080/1536383X.2020.1794849

43. Liu Y., Liu X., Dong W., Zhang L., Kong Q., Wang W. Efficient adsorption of sulfamethazine onto modified activated carbon: A plausible adsorption mechanism. Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Is. 1. Pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41598-017-12805-6

44. Jansson H., Lam P., Swenson J. A sustainable functionalization strategy to improving the material properties of bitumen by incorporating graphene. Next Materials. 2024. Vol. 4. 100205. DOI: 10.1016/j.nxmte.2024.100205

45. Shabiev F.K., Pakharukov Yu.V., Safargaliev R.F., Yezdin B.S., Vasiliev S.A. Use of nanofluids based on carbon nanoparticles to displace oil from the porous medium model [Snizhenie vyazkosti nefi s dobavleniem grafenovykh nanoplastinok]. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy. 2022. Vol. 8. No. 3. Pp. 106–125. DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-106-125 (rus)

Information about the authors

Lebedev, Mikhail S. Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. E-mail: michael11987@yandex.ru. National Research Tomsk State University. Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Yadykina, Valentina V. DSc, Professor. E-mail: vvya@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Vyrodova, Kristina S. Postgraduate student. E-mail: vyrodova.christina@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 15.05.2024

Для цитирования:

Лебедев М.С., Ядыкина В.В., Выродова К.С. Влияние особенностей состава шунгита различных месторождений на структурообразование полимерно-битумного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 8–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-8-25

For citation:

Lebedev M.S., Yadykina V.V., Vyrodova K.S. Effect of composition peculiarities of shungite from various deposits on structure formation of polymer modified bitumen binder. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 8–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-8-25

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-26-39

Соловьев В.Г., *Матюшин Е.В.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: matyushinev@mgsu.ru

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ

Аннотация. В статье рассматривается влияние вида и объемного содержания стальной фибры на механические свойства сверхвысокопрочного фибробетона (СВФБ). Было использовано пять видов фибры: волновая размером 15/0,3 и 22/0,3 мм, прямая 13/0,3 и 13/0,2 мм и анкерная 30/0,5 мм. Объемное содержание фибры составляло от 0 до 3 %. В ходе проведения экспериментальных исследований определялись прочность на сжатие, изгиб, а также энергия разрушения при изгибе.

Было установлено, что увеличение объемного содержания стальной фибры приводит к увеличению всех рассматриваемых свойств вне зависимости от вида волокон. При этом наибольшее влияние фибра оказывает на энергию разрушения при изгибе, наименьшее – на прочность при сжатии. Были установлены линейные зависимости между механическими характеристиками СВФБ и фактором фибры, отражающим объемное содержание, длину и диаметр отдельного волокна. Угол наклона аппроксимирующих линий зависимостей «прочность при сжатии – фактор фибры» и «прочность при изгибе – фактор фибры» принимает различные значения в зависимости от вида применяемых волокон, при этом наибольшее значение угла наклона было обнаружено для волновой фибры. Было обнаружено наличие порогового значения фактора фибры, по достижению которого стальная фибра приводит к увеличению прочности при изгибе СВФБ.

При помощи обобщенного критерия качества было установлено, что волновая фибра с размерами 22/0,3 мм является оптимальной альтернативой прямой фибре 13/0,2 мм, повсеместно используемой для изготовления сверхвысокопрочных фибробетонов.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный фибробетон, стальная фибра, волновая фибра, прямая фибра, анкерная фибра, механические свойства.

Введение. Одним из актуальных направлений развития современной технологии бетонов является комплексное модифицирование бетона органическими и минеральными добавками, в результате чего могут быть получены строительные материалы с улучшенными свойствами или более низкой себестоимостью. Перспективным конструкционным материалом является сверхвысокопрочный фибробетон (СВФБ), получаемый путем объединения цементно-песчаной матрицы, модифицированной активными и инертными минеральными добавками в комплексе с суперпластифицирующими добавками, обладающей чрезвычайно плотной и прочной структурой, а также высокопрочной стальной фиброй различного вида и размеров [1–3]. В результате могут быть получены композиты с прочностью при сжатии до 250 МПа, осевом растяжении – до 35 МПа, при изгибе – до 50 МПа, модулем упругости – до 55 ГПа, а также высокой стойкостью к агрессивному воздействию окружающей среды [4–6]. СВФБ находит применение при строительстве автомобильных, железнодорожных и велосипедных мостов, ажурных фасадных стеновых панелей, для ремонта и восстановления бетонных и железобетонных конструкций, а также устройства упоров для преднапрягаемой арматуры [7–10]. К преимуществам конструкций из СВФБ относятся более низкая материал- и трудоемкость

при изготовлении, уменьшенная масса изделий, более высокая долговечность и эстетическая выразительность по сравнению с обычными железобетонными изделиями.

Одним из ключевых факторов, определяющих прочностные и деформативные свойства СВФБ, является выбор вида и объемного содержания фибрового армирования. Как правило, большинство некоммерческих и коммерческих составов, например, таких как Ductal, SEMTEC_{MULTISCALE} армируются фиброй прямого профиля, объемное содержание которой может достигать 11 % [5, 11]. Относительно высокое объемное содержание фибры обеспечивает одно из наиболее существенных преимуществ СВФБ по сравнению с рядовыми и высокопрочными бетонами – высокая прочность на осевое растяжение, что позволяет отказаться от поперечной арматуры в изгибаемых элементах, а в ряде случаев и от продольной. В различных исследованиях было установлено, что стальная фибра также приводит к повышению прочности на сжатие до 35 %, растяжении при изгибе и раскалывании – до 56–230 % в зависимости от вида и содержания волокон [12–14]. Наряду с прочностными характеристиками, стальная фибра приводит к повышению относительной предельной деформации при растяжении и сжатии [15, 16]. Введение

стальной фибры приводит к небольшому увеличению модуля упругости, что соответствует известному «правилу смесей», при этом величина коэффициента Пуассона остается практически неизменной [17]. Помимо прямой фибры в фибробетонах используются волокна с деформированным профилем – анкерная, волновая или спиральная. К преимуществам этих видов волокон относится более высокая прочность сцепления фибры с бетонной матрицей за счет механической анкеровки отгибов, что приводит к более высоким прочностным характеристикам фибробетона. Зарубежными авторами проведены обширные испытания СВФБ с анкерной и спиральной фиброй [4, 18–20]. Полученные результаты говорят о целесообразности применения подобных волокон взамен прямых, в результате чего объемное содержание фибры в составе СВФБ может быть уменьшено при обеспечении требуемых прочностных характеристик. На территории Российской Федерации наибольшее применение находит волновая фибра, которая, вследствие наличия отгибов по всей длине волокна, обладает хорошим сцеплением с бетоном и имеет большой потенциал в сфере получения СВФБ. При этом в зарубежных источниках отсутствуют результаты определения физико-механических характеристик СВФБ с данным типом фибры. В отечественной же литературе приводятся результаты экспериментальных исследований для бетонной матрицы с прочностью при сжатии 72–106 МПа [21, 22], которые нельзя отнести к сверхвысокопрочным бетонам. В работах [23, 24] приводятся результаты испытаний СВФБ с волновой фиброй, которые имеют противоречивый характер. В связи с этим возникает необходимость определения и сравнения механических свойств СВФБ с различными видами и объемным содержанием стальной фибры, доступной на территории нашей страны.

В рамках проведения исследования были поставлены следующие задачи: 1) определение влияния вида и объемного содержания стальной фибры на механические свойства СВФБ; 2) выбор альтернативного варианта фибрового армирования взамен прямой фибры, которая традиционно применяется за рубежом в составах СВФБ и производство которой на сегодняшний день в Российской Федерации не налажено вследствие отсутствия массового применения этого материала в строительстве.

Материалы и методы. В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н. В качестве заполнителя использовался фракционированный кварцевый песок фракций 0,1–0,4 и 0,4–0,8 мм в соотношении 30:70, обеспечивающем максимальную плотность упаковки

частиц рыхлонасыпном состоянии. В качестве активной минеральной добавки применялся уплотненный микрокремнезем МКУ-85, соответствующий требованиям ГОСТ Р 58894-2020. Кварцевая мука с удельной поверхностью 429,6 м²/кг использовалась в качестве инертного наполнителя. Удобоукладываемость сталефибробетонных смесей регулировалась при помощи суперпластифицирующей добавки на основе эфиров поликарбоксилатов MasterGlenium 115. Основные свойства цемента и инертных компонентов представлены в таблицах 1 и 2, соответственно.

Таблица 1

Основные свойства портландцемента

Свойство		Значение
Нормальная густота, %		26,4
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа		53,6
Истинная плотность, кг/м ³		3105
Минералогический состав	C ₃ S, %	61,7
	C ₂ S, %	13,1
	C ₃ A, %	6,2
	C ₄ AF, %	15,4

Таблица 2

Физические свойства инертных компонентов

Компонент	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³
Кварцевый песок 0,1–0,4	1403	2640
Кварцевый песок 0,4–0,8	1524	2630
Кварцевая мука	–	2650
Микрокремнезем	–	2200

В работе было использовано пять видов стальной фибры: волновая диаметром 0,3 мм и длиной 15 и 22 мм, прямая длиной 13 мм и диаметром 0,2 и 0,3 мм и анкерная длиной и диаметром 30 и 0,5 мм, соответственно. Используемая в данной работе фибра произведена компанией ОАО «БМЗ», Беларусь. Прямая фибра с условным обозначением П(0,2) произведена компанией Briture CO., LTD, Китай. Основные параметры и внешний вид фибры представлены в таблице 3 и рисунке 1, соответственно.

Было испытано 16 составов сверхвысокопрочных фибробетонов, содержание стальной фибры в которых составляло 0, 1, 2 и 3 % по объему. Водоцементное соотношение, содержание кварцевой муки и микрокремнезема не изменялось и составляло 26,5, 20 и 20 % от массы цемента, соответственно. Суммарное содержание кварцевого песка во всех составах было принято равным 1055 кг. Содержание суперпластифицирующей добавки подбиралось таким образом,

чтобы обеспечить диаметр расплыва конуса Хегерманна в диапазоне 250–280 мм для составов с волновой и прямой фиброй и в диапазоне 170–200 мм для составов с анкерной фиброй. Путем проведения предварительных испытаний было установлено, что при диаметрах расплыва выше указанных снижается однородность материала вследствие седиментации стальной фибры, что

приводит к ухудшению механических характеристик СВФБ. Расход суперпластификатора составлял 2–3 % от массы цемента. Расход воды корректировался с учетом содержания воды в добавке таким образом, чтобы обеспечить постоянное водоцементное соотношение. Составы СВФБ с различным содержанием фибрового армирования без учета пластифицирующей добавки представлены в таблице 4.

Таблица 3

Свойства стальной фибры

Условное обозначение	Вид фибры	Длина, мм	Диаметр, мм	Соотношение l_f/d_f	Временное сопротивление разрыву, МПа
В(15)	Волновая	15	0,3	50	≥ 1800
В(22)	Волновая	22	0,3	73	≥ 1800
А	Анкерная	30	0,5	60	≥ 1150
П(0,3)	Прямая	13	0,3	43	≥ 1800
П(0,2)	Прямая	13	0,2	65	≥ 1800

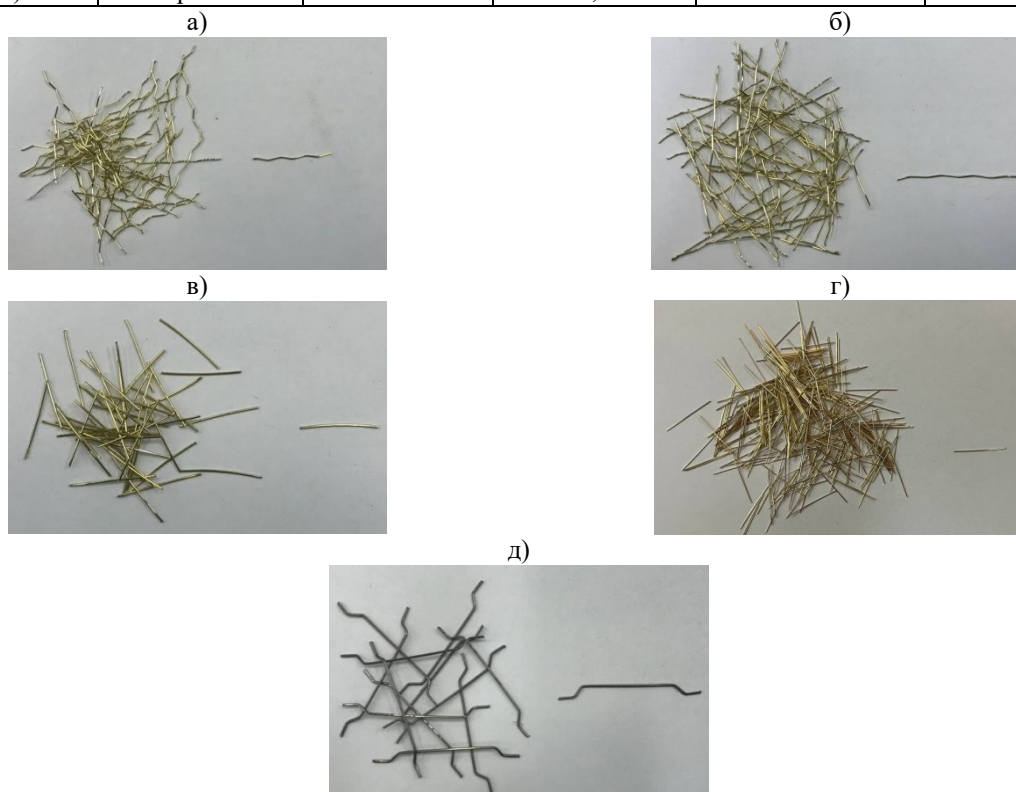


Рис. 1. Внешний вид стальной фибры: а) волновая фибра В(15); б) волновая фибра В(22); в) прямая фибра П(0,3); г) прямая фибра П(0,2); д) анкерная фибра А

Таблица 4

Составы сверхвысокопрочного фибробетона

Компонент	$V_f = 0 \%$	$V_f = 1 \%$	$V_f = 2 \%$	$V_f = 3 \%$
Цемент	796	783	769	756
Вода	211	207	204	200
Микрокремнезем	159	157	154	151
Кварцевая мука	159	157	154	151
Кварцевый песок 0,1–0,4	315	315	315	315
Кварцевый песок 0,4–0,8	740	740	740	740
Стальная фибра	0	78	156	234

Маркировка составов представлена в виде «Х-У», где Х – вид стальной фибры согласно таблице 3, У – объемное содержание стальной фибры в процентах от объема смеси.

Фибробетонные смеси приготавливались в автоматическом растворосмесителе в следующей последовательности: 1) перемешивание всех сухих компонентов в течение 1 минуты; 2) добавление воды и пластифицирующей добавки, перемешивание в течение 2 минут; 3) остановка на 1 минуту; 4) перемешивание смеси до однородного состояния в течение 3–8 минут; 5) добавление стальной фибры в течение 2 минут и последующее перемешивание в течение дополнительной 1 минуты. Суммарное время перемешивания составляло от 10 до 15 минут.

Для проведения испытаний из фибробетонной смеси изготавливались образцы-кубы размером 50×50×50 мм для испытания на сжатие и образцы-балочки размером 40×40×160 мм для испытания на изгиб. Малые размеры образцов-балочек были выбраны с целью повышения коэффициента ориентации фибры и снижения вариативности результатов испытаний, что позволяет более корректно оценить вклад формы и геометрических размеров фибры на ключевые свойства СВФБ. После формования образцы хранились в формах в нормальных температурно-влажностных условиях в течение двух суток, после чего подвергались тепловлажностной обработке в течение 48 часов при температуре 80 °С. После пропаривания и до момента испытания образцы хранились трое суток в помещении лаборатории.

Испытание на сжатие проводилось на гидравлическом прессе. Скорость нагружения образцов составляла 2 МПа/с. Предел прочности отдельного образца определялся по формуле:

$$R = \frac{F}{A}, [\text{МПа}] \quad (1)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь поперечного сечения образца, мм².

Испытание образцов на изгиб осуществлялось на электромеханическом прессе. Скорость перемещения траверсы во время испытания составляла 0,4 мм/мин. Расстояние между опорами составляло 100 мм. Предел прочности на изгиб отдельного образца определялся по формуле:

$$R_{tb} = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2}, [\text{МПа}] \quad (2)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, мм; b , h – ширина и высота поперечного сечения образца, мм.

Одним из основных свойств фибробетонов является количество поглощенной в процессе разрушения энергии, которая оценивается при помощи энергии разрушения. Энергия разрушения отдельного образца определялась по формуле:

$$G_f = \frac{W}{b \cdot h}, [\text{Н/мм}] \quad (3)$$

где W – работа, затрачиваемая на деформирование образца и определяемая как площадь под диаграммой «нагрузка-прогиб», Н · мм.

Работа, затрачиваемая на деформирование образца, определялась путем интегрирования диаграммы «нагрузка прогиб» до значения прогиба, равного 3,5 мм.

Значение прочности при сжатии и изгибе, а также энергии разрушения серии образцов определялось как среднеарифметическое значение результатов трех испытаний.

Основная часть. Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 5.

На графиках рисунка представлены зависимости прочности при сжатии СВФБ от объемного содержания фибры различного вида.

Таблица 5

Результаты испытаний

№	Маркировка	R , МПа	R_{tb} , МПа	G_f , Н/мм
1	К	151,5	10,68	317
2	В(15)-1	161,1	15,74	6480
3	В(15)-2	169,5	25,09	15710
4	В(15)-3	183,4	35,75	19360
5	В(22)-1	166,4	25,49	14550
6	В(22)-2	178,3	38,84	23480
7	В(22)-3	193,2	46,84	29170
8	П(0,3)-1	158,3	13,73	8070
9	П(0,3)-1	165,5	18,27	10000
10	П(0,3)-1	165,3	29,47	14120
11	П(0,2)-1	160,6	20,19	13910
12	П(0,2)-2	168,8	29,69	17000
13	П(0,2)-3	175,7	38,26	19970
14	А-1	162,1	15,13	4870
15	А-2	168,3	24,89	10090
16	А-3	180,4	35,15	15560

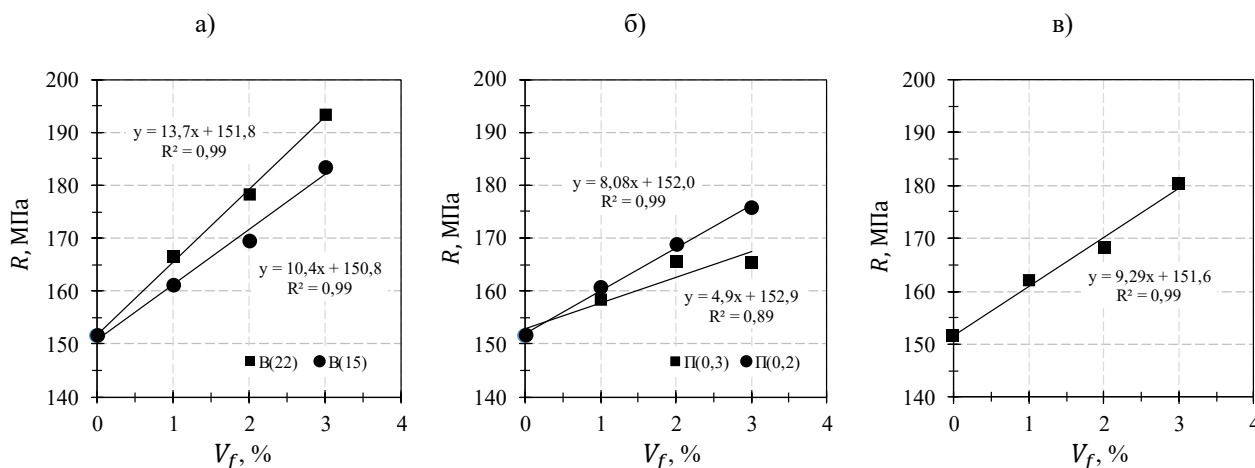


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии СВФБ от объемного содержания фибры:
а) составы с волновой фиброй; б) составы с прямой фиброй; в) составы с анкерной фиброй

Увеличение объемного содержания стальной фибры в составе СВФБ, вне зависимости от ее вида и геометрических размеров, приводит к пропорциональному увеличению прочности при сжатии, что соответствует результатам других авторов [12, 15]. Механизм увеличения прочности основан на способности фибры сдерживать рост микротрещин, возникающих при нагружении фибробетона, что выражается в увеличении максимального сжимающего напряжения, которое способен выдержать композит до разрушения [25]. При увеличении содержания фибры с 0 до 3 % прочность при сжатии увеличилась с 151,5 МПа до 183,4 МПа для составов с фиброй В(15), до 193,2 МПа для составов с фиброй В(22), до 165,3 МПа для составов с фиброй П(0,3), до 175,7 МПа для составов с фиброй П(0,2) и до 180,4 МПа для составов с фиброй А. При увеличении длины волновой фибры с 15 до 22 мм, как видно из рисунка 1-а, наблюдается более высокий прирост прочности на всех уровнях армирования: при содержании фибры 1, 2 и 3 % прочность при сжатии выше на 5,3, 8,8 и 9,8 МПа, соответственно. Улучшение механических свойств при увеличении длины фибры связано с увеличением усилия, которое необходимо приложить для сдвига фибры в теле бетонной матрицы в процессе разрушения композита. Диаметр стальной фибры также оказывает влияние на прочность при сжатии. Как показано на рисунке 1-б, при уменьшении диаметра прямой фибры с 0,3 до 0,2 мм наблюдается более интенсивный рост прочности при увеличении объема дисперсного армирования. Это связано с тем, что при уменьшении диаметра фибры резко увеличивается количество волокон, приходящихся на единицу объема материала. Например, количество волокон с размером 13/0,2 мм при объемном содержании 1 % составляет $24,5 \cdot 10^6$ шт/м³, в то время как волокон с размером 13/0,3 мм $10,9 \cdot 10^6$ шт/м³. Для учета

всех факторов дисперсного армирования, оказывающих влияние на механические свойства фибробетона, широко используется фактор фибры, χ_f , который рассчитывается по формуле [26]:

$$\chi_f = V_f \cdot l_f / d_f, [\%] \quad (4)$$

где V_f – объемное содержание фибры, %; l_f , d_f – длина и диаметр отдельного волокна, мм.

На графиках рисунка 2 представлены зависимости изменения относительной прочности при сжатии СВФБ от фактора фибры, χ_f . Относительная прочность, $R_{отн}$, была рассчитана как отношение прочности фибробетона к прочности бетонной матрицы по формуле:

$$R_{отн} = \frac{R_f}{R_o}, [-] \quad (5)$$

где R_f – прочность состава с фиброй, МПа; R_o – прочность состава без фибры, МПа.

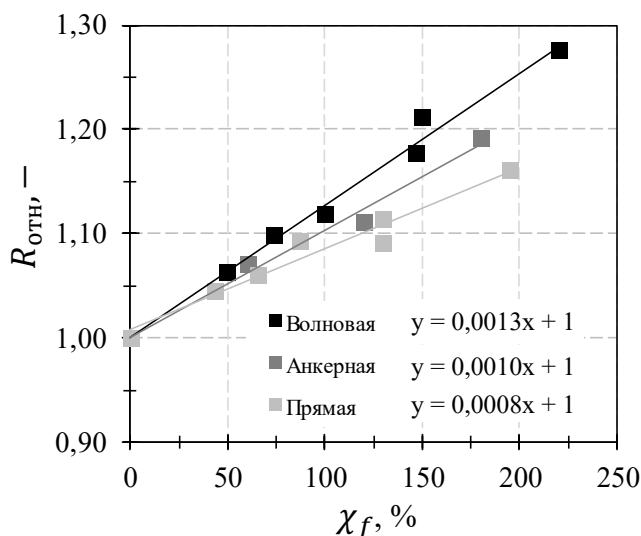


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии СВФБ от фактора фибры

Зависимость $R_{отн} = f(\chi_f)$ описывается линейным уравнением вида $y = a_1 \cdot x + 1$. Как

видно из рисунка 2, угол аппроксимирующих линий меняется в зависимости от вида фибры, что выражается в изменении коэффициента a_1 . Наибольшее значение коэффициента было получено для волновой фибры, наименьшее – для прямой. Угол наклона аппроксимирующих линий в данном случае зависит от прочности сцепления поверхности стальной фибры с бетонной матрицей. Эта величина зависит от прочности адгезионных связей, возникающих в контактной зоне, а также от механического зацепления при наличии отгибов у волокна. По данным из литературных источников, прочность сцепления волновой фибры с бетонной матрицей с прочностью при сжатии 140–160 МПа (аналогичной той, что используется в данной работе) находится в диапазоне 7,4–8,6 МПа, анкерной – 10,8–12,1, волновой – 14,6–16,8 МПа [27–29]. Прочность сцепления прямой фибры с бетоном является наименьшей, потому что она определяется в основном количеством химических связей в контактной зоне. Механическое зацепление реализуется только за

счет слегка деформированного конца волокна, образующегося в процессе резки проволоки [30], величиной которого можно пренебречь. Прочность сцепления анкерной и волновой фибры существенно выше, так как эти типы волокон имеют отгибы либо на концах фибры, либо по всей длине. Для выдергивания таких волокон из бетона необходимо не только разрушить химические связи, но и деформировать имеющиеся отгибы. Волновая фибра имеет большую прочность сцепления, в связи с большим количеством отгибов по длине волокна. Как видно из рисунка 2, значения коэффициента a_1 линейного уравнения соответствуют величинам прочности сцепления волокон, представленным в литературных источниках, и составляют 0,0013, 0,0010 и 0,0008 для волновой, анкерной и прямой фибры, соответственно.

На графиках рисунка 3 представлены зависимости относительной прочности при изгибе, $R_{tb,отн}$, от фактора фибры, χ_f .

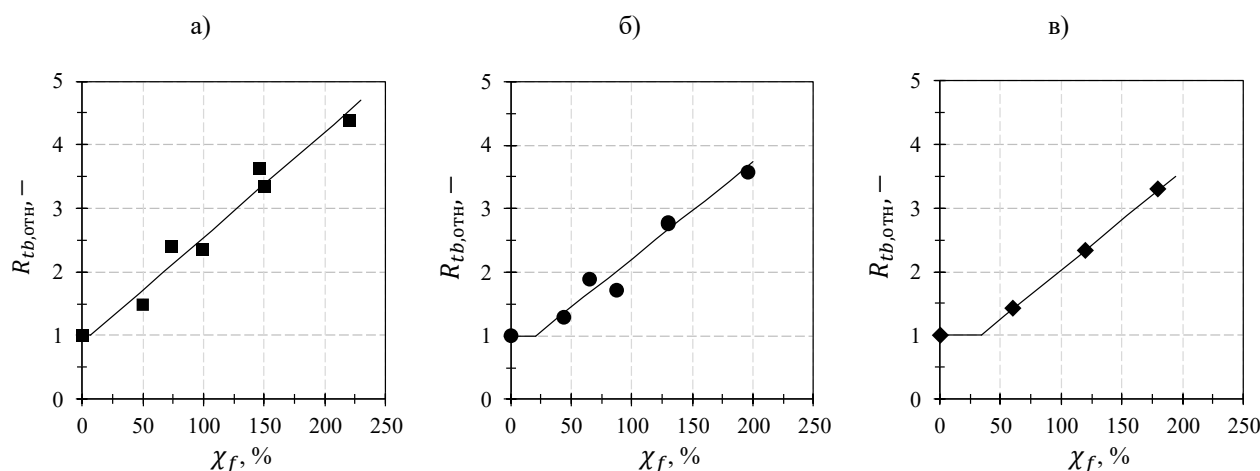


Рис. 3. Зависимость относительной прочности при изгибе СВФБ от фактора фибры:
а) составы с волновой фиброй; б) составы с прямой фиброй; в) составы с анкерной фиброй

Максимальная относительная прочность при изгибе для составов с волновой фиброй В(15) и В(22) составляет 3,35 и 4,39, соответственно; для составов с прямой фиброй П(0,3) и П(0,2) – 2,76 и 3,58, соответственно и для составов с анкерной фиброй – 3,29. При увеличении фактора фибры наблюдается пропорциональное увеличение относительной прочности при изгибе и полученные зависимости имеют схожий вид с представленными на рисунке 2. Существенным отличием является наличие минимального значения фактора фибры, $\chi_{f,min}$, после которого фибра начинает оказывать влияние на прочность при изгибе. При значениях $\chi_f < \chi_{f,min}$ относительная прочность при изгибе равна единице, то есть прочность фибробетона равна прочности бетонной мат-

рицы. Подобное поведение фибробетона объясняется тем, что после появления первой трещины в бетонной матрице изгибающая нагрузка воспринимается группой фибр, пересекающих плоскость разрушения. Суммарное усилие, которое может быть воспринято фибробетонным образцом, зависит количества волокон в сечении и их длины заделки в бетонную матрицу, что учитывается фактором фибры, χ_f , прочности сцепления фибры с бетоном, а также коэффициентом ориентации волокон в пространстве [31]. Если усилие, которое воспринимает группа фибр, меньше усилия, необходимого для разрушения бетонной матрицы, фибробетон переходит в стадию разрушения, что сопровождается выдергиванием фибр и снижением нагрузки, воспринимае-

мой материалом. В противном случае происходит увеличение прочности фибробетона относительно бетонной матрицы, что наблюдается при

$\chi_f > \chi_{f,min}$. Значения эмпирических коэффициентов линейного уравнения зависимости $R_{tb,отн} = f(\chi_f)$, а также $\chi_{f,min}$ для испытанных составов СВФБ представлены в таблице 6.

Таблица 6

Значения эмпирических коэффициентов зависимости $R_{отн} = f(\chi_f)$ и $\chi_{f,min}$

Вид фибры	$R_{tb,отн} = a_2 \cdot \chi_f + b$		$\chi_{f,min}, \%$
	a_2	b	
Волновая	0,017	0,88	7,1
Анкерная	0,016	0,47	33,9
Прямая	0,015	0,69	20,3

Значения коэффициента a_2 для составов с различными видами фибр имеют тот же порядок значений, что и величины прочности сцепления фибры с бетоном, представленными в работах [27-29]. Наибольшее значение коэффициента было получено для волновой фибры, наименьшее – для прямой, что также соответствует результатам определения прочности при сжатии, представленным на рисунке 2. Наименьшее значение $\chi_{f,min}$ было получено для составов с волновой фиброй, наибольшее – для фибробетонов с анкерной фиброй. Это может объясняться тем, что анкерная фибра изготовлена из низкоуглеродистой проволоки с низким пределом текучести, в результате чего при низких значениях χ_f растягивающее напряжения в волокнах приводят к их разрыву. Стоит отметить, что экспериментально полученные значения $\chi_{f,min}$ зависят от коэффициента ориентации фибры, при уменьшении которого будет происходить увеличение нижней границы фактора фибры. Коэффициент ориентации, в том числе, зависит от размера испытываемого образца и, как правило, принимает меньшие значения на образцах большего размера, что связано с уменьшением объема пристеночной зоны, в которой свободное вращение фибры в пространстве ограничено стенкой формы. В работе [32] приведены экспериментальные значения прочности при изгибе самоуплотняющихся составов СВФБ с прямой стальной фиброй при различных значениях χ_f . Испытания проводились на образцах размером $100 \times 100 \times 400$ мм. На графике рисунка 4 представлено сравнение значений $R_{tb,отн}$, полученных в данной работе для составов с прямой фиброй и в статье [32]. Как видно из рисунка 4, при увеличении сечения контрольных образцов с 40×40 мм до 100×100 мм значение $\chi_{f,min}$ сместилось с 20,3 до 32,5 %. При этом угол наклона аппроксимирующей линии к оси абсцисс практически не изменился.

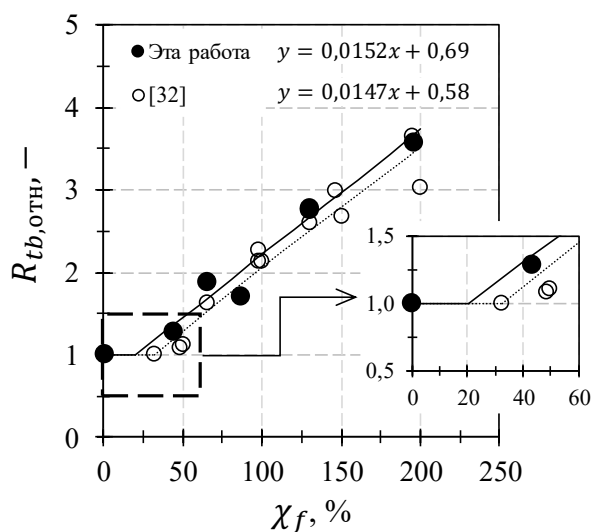


Рис. 4. Сравнение экспериментально полученных значений $R_{tb,отн}$ для составов с прямой фиброй с данными работы [32]

Одним из основных преимуществ фибробетонов является их способность поглощать большое количество энергии в процессе разрушения, вследствие того, что энергия тратится не только на разрушение бетонной матрицы, но и на выдергивание фибр. На рисунке 5-а представлены зависимости относительной энергии разрушения сверхвысокопрочных сталефибробетонов, $G_{F,отн}$, от фактора фибры. Максимальная относительная энергия разрушения для составов с волновой фиброй В(15) и В(22) составляет 61,1 и 92,0, соответственно; для составов с прямой фиброй П(0,3) и П(0,2) – 44,5 и 63,0, соответственно, и для составов с анкерной фиброй – 49,1. Наибольшие значения энергии разрушения были получены для составов с волновой фиброй, наименьшие – с анкерной. Более низкие значения G_F составов с анкерной фиброй обусловлены, с одной стороны, более низкой прочностью волокон при растяжении, что приводит к их частичному разрыву при выдергивании, а с другой – concentra-

цией напряжений в бетонной матрице вблизи анкеров, приводящих к разрушению бетона и уменьшению эффективной площади контакта с поверхностью волокна [26]. Энергия разрушения также линейно зависит от фактора фибры. При этом отсутствует граничное значение $\chi_{f,min}$, как в случае прочности при изгибе, что говорит о включении в работу фибрового армирования вне зависимости от его вида и объемного содержания. При равном значении прочности при изгибе составы с прямой фиброй имеют немного более высокую энергию разрушения по сравнению с волновой или анкерной фиброй, что опять же мо-

жет быть связано с отсутствием локальных разрушений бетонной матрицы при выдергивании прямых волокон. Однако для достижения равной прочности при изгибе объемное содержание прямой фибры должно быть выше по сравнению с волновой или анкерной, что приведет к удорожанию состава. Была установлена общая тенденция к увеличению энергии разрушения при увеличении прочности СВФБ при изгибе, которая описывается линейным уравнением с коэффициентом детерминации 0,89 (рисунок 5-б). Полученная зависимость может использоваться для ориентировочной оценки энергии разрушения по результатам испытаний на изгиб.

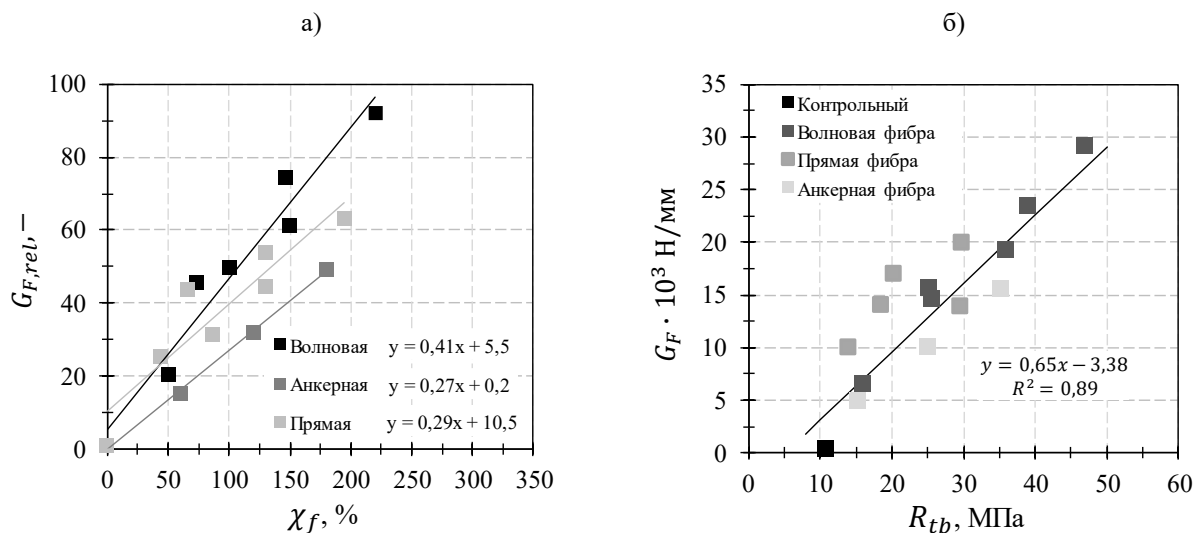


Рис. 5. а) Зависимость относительной энергии разрушения СВФБ от фактора фибры; б) зависимость энергии разрушения СВФБ от прочности при изгибе

Одной из задач данной работы было определение оптимального варианта фибрового армирования СВФБ. Для этого было выбрано 5 составов с различными видами стальной фибры, содержание которой составляет 2 %, что соответствует наиболее часто встречаемому содержанию фибры в составах сверхвысокопрочных фибробетонов. Для оценки эффективности того или иного вида дисперсного армирования был рассчитан обобщенный критерий качества по формуле [33]:

$$F = \sqrt[4]{k_R \cdot k_{R_{tb}} \cdot k_{G_F} \cdot k_V}, [-] \quad (6)$$

где k_R , $k_{R_{tb}}$, k_{G_F} и k_V – частные критерии качества, характеризующие изменение прочности при сжатии, изгибе, энергии разрушения и скорости седиментации волокна относительно базового состава. В качестве базового состава была выбрана смесь П(0,2)-2, содержащая прямую стальную фибру диаметром 0,2 мм, применение которой находит широкое применение в мировой практике. Критерий k_V имеет важное значение для самоуплотняющихся фибробетонных смесей с низкими значениями предельного напряжения

сдвига и пластической вязкости. Вследствие разности плотностей бетонной матрицы и фибры последняя имеет тенденцию к седиментации, при интенсивном протекании которой возрастает риск ухудшения механических свойств СВФБ. Согласно закону Стокса, при прочих равных условиях скорость оседания сферической частицы прямо пропорциональна квадрату ее диаметра. Для оценки склонности стальной фибры к седиментации в самоуплотняющихся бетонных смесях был рассчитан диаметр сферы эквивалентного фибре объема по формуле:

$$d_{f,eq} = \sqrt[3]{1,5 \cdot l_f \cdot d_f^2} \text{ [мм]} \quad (7)$$

При увеличении эквивалентного диаметра увеличится начальная скорость оседания волокна, что повышает риск расслоения. Формулы расчета частных критериев представлены в таблице 7, результаты расчета частных и обобщенного критерия – в таблице 8.

По результатам расчетов было установлено, что при условии равной значимости каждого из четырех выбранных критериев, наиболее оптимальным альтернативным вариантом фибрового

армирования является использование волновой фибры 22/0,3 мм, значение обобщенного критерия для которого равняется 1,05. Наихудшим альтернативным вариантом является использование

анкерной фибры 30/0,5 мм как с точки зрения механических свойств СВФБ, так и седиментационной устойчивости фибры в самоуплотняющихся смесях.

Таблица 7

Формулы для расчета частных критериев качества

Показатель	Формула	Примечание
Критерий прочности при сжатии	$k_R = \frac{R_i}{R_b} (8)$	R_i – прочность при сжатии i-го состава, МПа R_b – прочность при сжатии базового состава, МПа
Критерий прочности при изгибе	$k_{R_{tb}} = \frac{R_{tb,i}}{R_{tb,b}} (9)$	$R_{tb,i}$ – прочность при изгибе i-го состава, МПа $R_{tb,b}$ – прочность при изгибе базового состава, МПа
Критерий энергии разрушения	$k_{G_F} = \frac{G_{F,i}}{G_{F,b}} (10)$	$G_{F,i}$ – энергия разрушения i-го состава, МПа $G_{F,b}$ – энергия разрушения базового состава, МПа
Критерий седиментационной устойчивости	$k_V = \frac{d_{f,eq,b}}{d_{f,eq,i}} (11)$	$d_{f,eq,i}$ – эквивалентный диаметр фибры i-го состава, МПа $d_{f,eq,b}$ – эквивалентный диаметр фибры базового состава, МПа

Таблица 8

Результаты расчета частных и обобщенного критерия качества

Состав	k_R	$k_{R_{tb}}$	k_{G_F}	k_V	F
П(0,2)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
П(0,3)	0,98	0,62	0,59	0,76	0,72
В(15)	1,00	0,85	0,92	0,73	0,87
В(22)	1,06	1,31	1,38	0,64	1,05
А	1,00	0,84	0,59	0,41	0,67

Выводы. В работе представлены результаты испытаний сверхвысокопрочных сталефибробетонов, содержащих волновую, анкерную и прямую стальную фибру различных геометрических размеров и объемного содержания. По результатам проведения экспериментальных исследований и анализа полученных данных могут быть сделаны следующие выводы:

1. Прочность при сжатии СВФБ линейно зависит от комплексного параметра, факторы фибры (χ_f), учитывающего объемное содержание, длину и диаметр волокон в составе материала. Угол наклона графиков зависимостей $R = f(\chi_f)$ к оси абсцисс зависит от вида фибры и принимает наибольшее значение для волновой фибры, наименьшее – для прямой. В зависимости от вида фибры и значения величины χ_f прочность при сжатии относительно бетонной матрицы может быть увеличена на 28%.

2. Прочность при изгибе СВФБ также линейно зависит от фактора фибры. При равном значении фактора фибры наибольшей прочностью обладают составы с волновой фиброй. Было обнаружено наличие минимального значения фактора фибры, $\chi_{f,min}$, после достижения которого добавление стальной фибры приводит к увеличению прочности фибробетона при изгибе относительно прочности бетонной матрицы. Сравнивая собственные экспериментальные значения с данными из литературных источников, было

установлено влияние размера контрольных образцов на величину $\chi_{f,min}$. При этом общий вид зависимости $R_{tb} = f(\chi_f)$ не изменяется. В зависимости от вида фибры и значения величины χ_f прочность при изгибе относительно бетонной матрицы может быть увеличена на 439 %.

3. Наиболее значительное влияние стальная фибра оказывает на энергию разрушения, G_F , увеличение которой происходит при любых значениях χ_f , отличных от нуля. Была установлена линейная зависимость между энергией разрушения и прочностью при изгибе. При равных значениях прочности при изгибе составы с прямой фиброй имеют немного более высокую энергию разрушения. В зависимости от вида фибры и значения величины χ_f прочность энергия разрушения относительно бетонной матрицы может быть увеличена на 9200 %.

4. При помощи обобщенного критерия качества, учитывающего механические характеристики СВФБ и седиментационную устойчивость стальной фибры в самоуплотняющихся смесях, было установлено, что наилучшей альтернативой прямой стальной фибре с размерами 13/0,2 мм является волновая фибра 22/0,2 мм.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

(грант на поддержку научных исследований аспирантов, проект № 9-480/130).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bajaber M.A., Hakeem I.Y. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10. Pp. 1058–1074. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.051
2. Azmee N.M., Shafiq N. Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00197
3. Yang J., Chen B., Su J., Xu G., Zhang D., Zhou J. Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2022. Vol. 9. Pp. 363–387. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.05.001
4. Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) under Direct Tensile Loading // *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 48. Pp. 53–66. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015
5. Wille K., Naaman A., El-Tawil S. Optimizing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete // *ACI Concrete International*. 2011. Vol. 33. Pp. 35–41.
6. Yoo D.Y., Lee J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites // *Composite Structures*. 2013. Vol. 106. Pp. 742–753. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.033
7. Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B. Review of Ultra-High Performance Concrete and Its Application in Bridge Engineering // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844
8. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., Guo P., Lyu Z., Abu-Obeidah A., Nassif H., Wang H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) // *Composites Part B*. 2021. Vol. 224. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220
9. Mash J.A., Harries K.A., Rogers C. Repair of corroded steel bridge girder end regions using steel, concrete, UHPC and GFRP repair systems // *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 207. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107975
10. Марченко М.С., Чилин И.А., Селютин Н.М. Опыт применения сверхвысокопрочного сталефибробетона в элементах усиления железобетонных конструкций // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021. №30. С. 41–50. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(301-61-50)
11. Rossi P., Arca A., Parant E., Fakhri P. Bending and Compressive Behaviours of a New Cement Composite // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Pp. 27–33. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.043
12. Yang J., Chen B., Nuti C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 302. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124104
13. Jiao C., Ta J., Niu Y., Meng S., Chen X.F., He S., Ma R. Analysis of the flexural properties of ultra-high-performance concrete consisting of hybrid straight steel fibers // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01153
14. Yoo D.Y., Kim S., Park G.J., Park J.J., Kim S.W. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites // *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. Pp. 375–388. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.069
15. Shao R., Wu C., Li J., Liu Z. Investigation on the mechanical characteristics of multiscale mono/hybrid steel fibre-reinforced dry UHPC // *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104681
16. Yang J., Chen B., Wu X., Xu G. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130349
17. Soloviev V., Matiushin E. The Effects of Corrugated Steel Fiber on the Properties of Ultra-High Performance Concrete of Different Strength Levels // *Buildings*. 2023. Vol. 13. DOI: 10.3390/buildings13102591
18. Qiu M., Shao X., Zhu Y., Hessein H.H., Li F., Li X. Effect of Aspect Ratios of Hooked End and Straight Steel Fibers on the Tensile Strength of UHP-FRC // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022. Vol. 34. Iss. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004283
19. Pyo S., Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension // *Cement and Concrete Composites*. 2015. Vol. 56. Pp. 15–24. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.002
20. Abellán-García J. Tensile behavior of recycled-glass-UHPC under direct tensile loading // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01308
21. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Горбунов И.А. Влияние характеристик фибры на кубиковую и призмную прочность

сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей // Бетон и железобетон. 2013. №6. С. 6–9.

22. Krasnovsy R., Kapustin D., Korotkikh D., Efshov L. Complete diagrams of strain under axial tension of steel-fiber reinforced concrete with different fiber types and content // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012013

23. Тамов М.М., Салиб М.И.Ф., Абуизеих Ю.К.И., Софьяников О.Д. Подбор составов и исследование прочностных характеристик самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. №4. С. 25–39. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39

24. Чилин И.А. Влияние технологических факторов на свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. №4. С. 135–157. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-135-147

25. Li V.C. A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites // Cement and Concrete Composites. 1992. Vol. 14. Iss. 2. Pp. 131–141. DOI: 10.1016/0958-9465(92)90006-H

26. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents // Materials and Structures. 2011. Vol. 44. Pp. 583–598. DOI: 10.1617/s11527-010-9650-4

27. Yoo D.Y., Park J.J., Kim S.W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber type // Composite Structures. 2017. Vol. 174. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.064

28. Kang S.H., Ahn T.H., Kim D.J. Effect of grain size on the mechanical properties and crack formation of HPFRCC // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Iss. 5. Pp. 710–720. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.02.011

29. Zhang H., Ji T., Lin X. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 211. Pp. 688–702. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274

30. Wille K., Naaman A.E. Effect of Ultra-High-Performance Concrete on Pullout Behavior of High-Strength Brass-Coated Straight Steel Fibers // ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. Pp. 451–462.

31. Abrishambaf A., Pimentel M., Nunes S. A meso-mechanical model to simulate the tensile behaviour of ultra-high performance fibre-reinforced cementitious composites // Composite Structures. 2019. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110911

32. Park J.J., Yoo D.Y., Park G.J., Kim S.W. Feasibility of Reducing the Fiber Content in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete under Flexure // Materials. 2017. Vol. 10. DOI: 10.3390/ma10020118

33. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Технико-экономическая эффективность применения наномодифицированного наполнителя для асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2011. №13. С. 536–543. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.536-543

Информация об авторах

Соловьев Вадим Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: s_vadim_g@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Матюшин Евгений Валерьевич, аспирант кафедры строительного материаловедения. E-mail: matyushinev@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 13.05.2024 г.

© Соловьев В.Г., Матюшин Е.В., 2024

Soloviev V.G., *Matiushin E.V.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

**E-mail: matyushinev@mgsu.ru*

MECHANICAL PROPERTIES OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF STEEL FIBER

Abstract. The article examines the influence of steel fiber type and volumetric content on the mechanical properties of UHPFRC. Five fiber types were used: corrugated 15/0.3 and 22/0.3 mm, straight 13/0.3 and 13/0.2 mm, and hooked-end 30/0.5 mm. The fiber volume content ranged from 0 to 3%. During the experimental studies, compressive strength, flexural strength, as well as the flexural fracture energy were determined. It has been discovered that an increase in the volumetric content of steel fiber results in an enhancement

of all the properties under consideration, irrespective of the type of fiber. The fiber has the biggest effect on the bending fracture energy and the least on the compressive strength. Linear relationships between the mechanical characteristics of UHPFRC and the fiber factor were established, which reflects the volumetric content, length, and diameter of an individual fiber. The slope angle of the approximating lines of the “compressive strength-fiber factor” and “flexural strength-fiber factor” relationships takes on different values depending on the type of fiber used. The highest slope angle is found for corrugated fiber. It was discovered that there is a threshold value of the fiber factor, upon reaching which the steel fiber leads to an increase in the flexural strength of the UHPFRC. According to a generalized quality criterion it has been determined that corrugated fiber with dimensions of 22/0.3 mm is the optimal substitute for straight fiber 13/0.2 mm, which is widely utilized for the production of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete.

Keywords: Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, UHPFRC, steel fiber, corrugated fiber, straight fiber, hooked-end fiber, mechanical properties

REFERENCES

1. Bajaber M.A., Hakeem I.Y. UHPC Evolution, Development, and Utilization in Construction: A Review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 10. Pp. 1058–1074. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.12.051
2. Azmee N.M., Shafiq N. Ultra-High Performance Concrete: From Fundamental to Applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00197
3. Yang J., Chen B., Su J., Xu G., Zhang D., Zhou J. Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2022. Vol. 9. Pp. 363–387. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.05.001
4. Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC) under Direct Tensile Loading. *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 48. Pp. 53–66. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015
5. Wille K., Naaman A., El-Tawil S. Optimizing ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Concrete International*. 2011. Vol. 33. Pp. 35–41.
6. Yoo D.Y., Lee J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 2013. Vol. 106. Pp. 742–753. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.033
7. Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B. Review of Ultra-High Performance Concrete and Its Application in Bridge Engineering. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844.
8. Du J., Meng W., Khayat K. H., Bao Y., Guo P., Lyu Z., Abu-Obeidah A., Nassif H., Wang H. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B*. 2021. Vol. 224. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220
9. Mash J.A., Harries K.A., Rogers C. Repair of corroded steel bridge girder end regions using steel, concrete, UHPC and GFRP repair systems. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 207. DOI:10.1016/j.jcsr.2023.107975
10. Marchenko M., Chilin I., Selyutin N. Experience in using ultra high performance fiber reinforced concrete elements [Opyt primeneniya sverhvysokoprochnogo stalefibrobetona v elementah usileniya zhelezobetonnykh konstrukcij]. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021. No. 30. Pp. 41–50. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(301-61-50 (rus))
11. Rossi P., Arca A., Parant E., Fakhri P. Bending and Compressive Behaviours of a New Cement Composite. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Pp. 27–33. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.043
12. Yang J., Chen B., Nuti C. Influence of steel fiber on compressive properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 302. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124104
13. Jiao C., Ta J., Niu Y., Meng S., Chen X.F., He S., Ma R. Analysis of the flexural properties of ultra-high-performance concrete consisting of hybrid straight steel fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01153
14. Yoo D.Y., Kim S., Park G.J., Park J.J., Kim S.W. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. Pp. 375–388. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.069
15. Shao R., Wu C., Li J., Liu Z. Investigation on the mechanical characteristics of multiscale mono/hybrid steel fibre-reinforced dry UHPC. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104681
16. Yang J., Chen B., Wu X., Xu G. Quantitative analysis of steel fibers on UHPFRC uniaxial tensile behavior using X-CT and UTT. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130349
17. Soloviev V., Matiushin E. The Effects of Corrugated Steel Fiber on the Properties of Ultra-High Performance Concrete of Different Strength

Levels. Buildings. 2023. Vol. 13. DOI: 10.3390/buildings13102591

18. Qiu M., Shao X., Zhu Y., Hessein H.H., Li F., Li X. Effect of Aspect Ratios of Hooked End and Straight Steel Fibers on the Tensile Strength of UHP-FRC. Journal of Materials in Civil Engineering. 2022. Vol. 34. Iss. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004283

19. Pyo S., Wille K., El-Tawil S., Naaman A.E. Strain rate dependent properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension. Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 56. Pp. 15–24. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.002

20. Abellán-García J. Tensile behavior of recycled-glass-UHPC under direct tensile loading. Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01308

21. Dorf V.A., Krasnovsky R.O., Kapustin D.E., Gorbunov I.A. Study of the characteristics of fibers on the cubic and prismatic strength of steel fiber reinforced concrete with a cement-sand matrix [Vliyaniye harakteristik fibry na kubikovuyu i prizmennuyu prochnost' stalefibrobetona s cementno-peschanoy matricej]. Concrete and Reinforced Concrete. 2013. Vol. 6. Pp. 6–9. (rus)

22. Krasnovsy R., Kapustin D., Korotkikh D., Efishov L. Complete diagrams of strain under axial tension of steel-fiber reinforced concrete with different fiber types and content. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012013

23. Tamov M.M., Salib M.I.F., Abuzeih Yu.K.I., Sofyanikov O.D. mix design and study of strength properties of self-compacting ultra high-performance fiber-reinforced concrete [Podbor sostavov i issledovanie prochnostnykh harakteristik samouplotnyayushchegosya sverhvysokoprochnogo stalefibrobetona]. News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022. No. 4. Pp. 25–39. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39 (rus)

24. Chilin I. Influence of technological factors on the properties of ultra-high-performance fiber reinforced concrete [Vliyaniye tekhnologicheskikh faktorov na svoystva sverhvysokoprochnogo stalefibrobetona]. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2020. No. 27. Pp. 135–147.

DOI: 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-135-147 (rus)

25. Li V.C. A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites. Cement and Concrete Composites. 1992. Vol. 14. Iss. 2. Pp. 131–141. DOI: 10.1016/0958-9465(92)90006-H

26. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. Materials and Structures. 2011. Vol. 44. Pp. 583–598. DOI: 10.1617/s11527-010-9650-4

27. Yoo D.Y., Park J.J., Kim S.W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber type. Composite Structures. 2017. Vol. 174. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.064

28. Kang S.H., Ahn T.H., Kim D.J. Effect of grain size on the mechanical properties and crack formation of HPFRCC. Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Iss. 5. Pp. 710–720. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.02.011

29. Zhang H., Ji T., Lin X. Pullout behavior of steel fibers with different shapes from ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with granite powder under different curing conditions. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 211. Pp. 688–702. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.274

30. Wille K., Naaman A.E. Effect of Ultra-High-Performance Concrete on Pullout Behavior of High-Strength Brass-Coated Straight Steel Fibers. ACI Materials Journal. 2013. Vol. 110. Pp. 451–462.

31. Abrishambaf A., Pimentel M., Nunes S. A meso-mechanical model to simulate the tensile behaviour of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composites. Composite Structures. 2019. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110911

32. Park J.J., Yoo D.Y., Park G.J., Kim S.W. Feasibility of Reducing the Fiber Content in Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete under Flexure. Materials. 2017. Vol. 10. DOI: 10.3390/ma10020118

33. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Technical and economic efficiency of using nanomodified filler for asphalt concrete [Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya nanomodificirovannogo napolnitelya dlya asfal'tobetona]. Vestnik MGSU. 2011. No. 13. Pp. 536–543. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.536-543 (rus)

Information about the authors

Soloviev, Vadim G. PhD, Assistant professor. E-mail: s_vadim_g@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Matiushin, Evgenii V. Postgraduate student. E-mail: matyushinev@mgsu.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Received 13.05.2024

Для цитирования:

Соловьев В.Г., Матюшин Е.В. Механические свойства сверхвысокопрочного фибробетона с различными видами стальной фибры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 26–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-26-39

For citation:

Soloviev V.G., Matiushin E.V. Mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete with different types of steel fiber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 26–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-26-39

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-40-48

¹Муртазаев С.-А.Ю., ^{1,2*}Саламанова М.Ш.¹Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук

*E-mail: madina_salamanova@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

Аннотация. Получение качественного и надежного мелкозернистого бетона с использованием ресурсосберегающих технологий является актуальной и весомой задачей. Популярность мелкозернистого бетона определяется возможностью отказа от дорогого и дефицитного во многих районах страны крупного заполнителя, возможностью регулирования в широких пределах структуры и технических свойств бетонной смеси и бетона, качеством бетонирования густоармированных конструкций сложной конфигурации, повышением ударной прочности железобетонных элементов.

В связи с этим для повышения востребованности этого продукта были проведены исследования по получению мелкозернистого бетона с использованием местных доступных техногенных материалов и технических приёмов, основанных на установленных закономерностях влияния рецептурно-технологических параметров на физико-механические и эксплуатационные характеристики. Отсутствие качественных крупных песков в регионе явилось предпосылкой поиска новых решений для управления процессами контактообразования между частицами цемента и мелкого заполнителя. Предлагаемый в работе рецептурно-технологический прием, заключающийся в комплексном использовании фракционированного заполнителя поверхностно активированного катионной добавкой алкилдиметилбензиламмоний хлорида, модифицированного микрокремнеземом вяжущего, способствовал усилению адгезионной прочности в зоне контакта «цементный камень – заполнитель» и формированию плотной структуры, сложенной из высокопрочных и труднорастворимых образований. Предлагаемая технология получения мелкозернистых бетонов позволит создавать качественные композиты с использованием техногенного сырья, решая тем самым проблему дефицита пригодных для строительства крупных природных песков.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, фракционированный заполнитель, композиционные вяжущие, поверхностная обработка, катионоактивная добавка, микрокремнезем.

Введение. Вопросам модернизации и внедрения инновационных технологий получения качественных композитов уделяется большое внимание практически на всех мировых научных площадках, и связано это с высокими темпами развития высотного монолитного строительства [1–4]. Но проблемы экологического порядка буквально пронизывают строительную отрасль, ведь уже начиная с разработки карьера и добычи минерального сырья мы наносим непоправимый вред природному фонду и конечно же себе. Поэтому рациональное потребление первичных природных ресурсов и максимальное использование промышленных отходов позволят решать многие глобальные вопросы, наиболее значимым из которых является экологическая безопасность окружающей среды обитания [5–9].

Основываясь на принципах выдвинутой концепции была поставлена цель получения качественного и надежного материала с использованием ресурсосберегающих технологий. Популярность мелкозернистого бетона объясняется многими факторами, в частности, возможностью замены дорогого и дефицитного во многих районах

страны крупного заполнителя; возможностью регулирования структуры и технических свойств бетонной смеси и бетона; качеством бетонирования густоармированных конструкций сложной конфигурации; изготовлением ударостойких и изгибаемых элементов; производством дорожных покрытий [10–13]. Единственным моментом, усложняющим производство мелкозернистого бетона, является высокий расход матричной основы вяжущего, нехватка качественных природных песков, трудности с обеспечением стабильных деформативных показателей конструкций.

В связи с этим для повышения востребованности этого продукта были проведены исследования по получению мелкозернистого бетона с использованием местных доступных техногенных материалов и технических приёмов, базирующихся на основе установленных закономерностей влияния рецептурно-технологических параметров на физико-механические и эксплуатационные характеристики. Отсутствие качественных крупных песков в регионе натолкнуло на поиск новых решений для управления процессами

контактообразования между частицами цемента и мелкого заполнителя.

В работах [14–16] приводятся результаты обработки поверхности заполнителя растворами кислот, которая благоприятно сказалась на формировании структуры цементного камня в целом, кристаллохимических преобразованиях в контактной зоне «вяжущее вещество – модифицированный заполнитель». В процессе диффузионных процессов на поверхности активированного кислотой заполнителя изменяется его электрический потенциал и повышается количество активных центров кристаллизации, что приводит к улучшению прочности, коррозионной стойкости бетона. Установлено [17–20], что формирование структуры и прочности в зоне контакта зависят от величины и количества скрытых центров кристаллизации на поверхности минералов наполнителя и заполнителей. Ведь в зависимости от адсорбционной способности дефектной поверхности минералов заполнителей, проявляются определенные силы в жидкой фазе насыщенной продуктами гидролиза двух и трехкальциевых силикатов, с формированием прочных эпитаксиальных соединений с гидратными образованиями.

Материалы и методы. Для повышения качества мелкозернистого бетона, и в частности, усиления контактной прочности в зоне «цемент – заполнитель» применялась поверхностная обработка фракционированного заполнителя катионоактивной добавкой алкилдиметилбензиламмоний хлорид (АДБАХ), формула: $R(CH_3)_2[NCH_2C_6H_5]^+Cl^-$, где R – остаток, содержащий C_{12} – C_{18} . Фракционированный мелкий заполнитель получали обогащением высевок (ООО ГК «Лам») от дробления горных пород, мелким кварцевым песком Червленского карьера. Экспериментальным путем, установлено наиболее рациональное соотношение в заполнителе высевок и мелкого песка, составившее 66:34 %. Характеристики полученного материала соответствуют требованиям ГОСТ 8736-93 (табл. 1). Утилизация определенной доли отходов ООО ГК «Лам» позволит внести значительный вклад в защиту окружающей среды, так как высевки от дробления горных пород захламляют территорию компании и близ находящиеся сельскохозяйственные земли. Кроме того, это решает проблему дефицита качественных крупных песков в регионе.

Таблица 1

Зерновой состав и свойства фракционированного песка

№	Наименование показателей	Фактическое значение		
		Размер сит, мм	Остатки на ситах, % по массе	
			частные	полные
1	Зерновой состав: частные и полные остатки на ситах, % по массе	5,0	1,1	1,1
		2,5	17,2	18,3
		1,25	12,5	30,8
		0,63	25,6	56,4
		0,315	30,6	87,0
		0,16	10,4	97,4
		< 0,16	2,6	100
2	Модуль крупности песка	2,91 (крупный песок)		
3	Класс песка	II		
4	Содержание ПГИ, %	2,6 %		
5	Содержание глины в комках, %	нет		
6	Истинная плотность зерен, кг/м ³	2620		
7	Насыпная плотность, кг/м ³	1585		
8	Пустотность песка, %	38,4		

Результаты рентгенофазового качественного анализа (РФА), выполненные на дифрактометре «ARLX'TRA», идентифицировали в составе фракционированного заполнителя полимиктовый песок и обломки однородного известняка и темно-серой терригенной породы. РФА подтвердил присутствие следующих минеральных фаз: кварц, плагиоклаз (альбит – олигоклазового состава), микроклин, хлорит, слюды (и гидрослюды), кальцит (рис. 1).

Основная часть. Полученный, путём смешивания высевок и с мелким кварцевым песком,

фракционированный мелкий заполнитель подвергали сушке в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 2 часов и в последующем активировали поверхностной обработкой алкилдиметилбензиламмоний хлоридом. Оптимальная дозировка модификатора была определена исследованиями и составила 0,1 % от массы портландцемента. Следует отметить, что с увеличением количества ПАВ наблюдалось разрыхление формовочной смеси, ослаблялись силы сцепления между компонентами матричной системы и смеси, что приводило к снижению прочности

композита на 15–18 %. Для подтверждения эффективности поверхностной обработки заполнителя, алкилдиметилбензиламмоний хлорид в дозировке 0,1 % от массы портландцемента, вводили в бетонную смесь с водой затворения, и в сопоставлении с контрольными образцами без добавки, наблюдалось повышение прочности на 9–10 %. При этом полученные составы уступают

по прочности образцам с использованием модифицированного заполнителя. Следовательно, активация фракционированного заполнителя катионактивной ПАВ способствовала проявлению гидрофобных свойств этого компонента, снизила водопоглощение, усилила взаимодействие в контактной зоне «вяжущее – заполнитель», обеспечив прирост прочности.

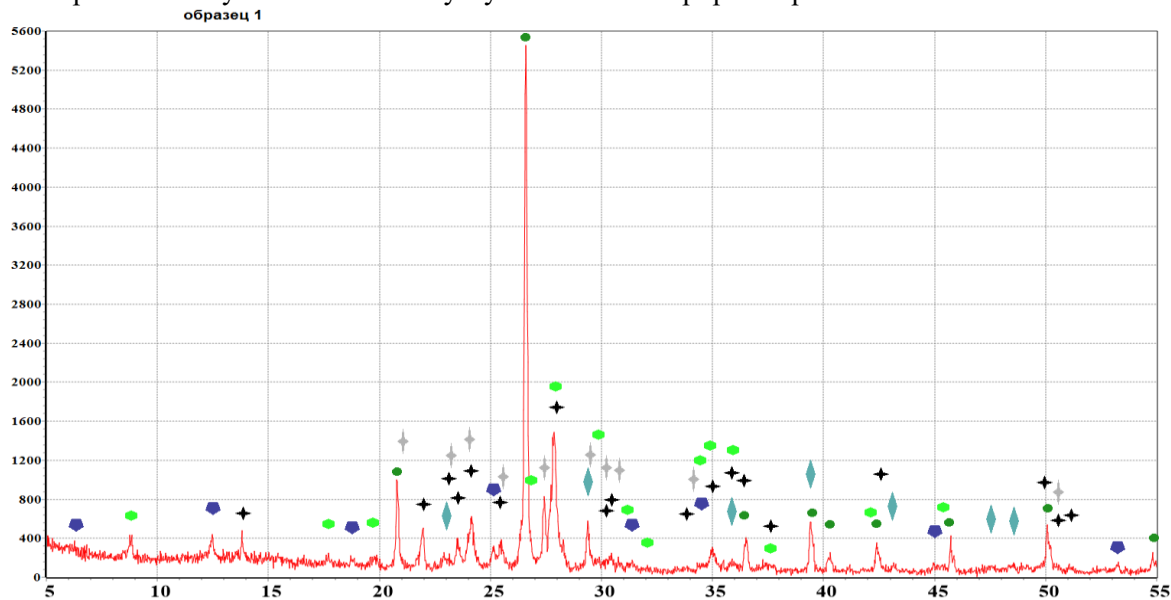


Рис. 1. РФА фракционированного мелкого заполнителя:

● кварц; ■ хлорит (сильно хлоритизированные темноцветные силикаты);
 ◆ слюды и гидрослюда; ✕ плагиоклаз (альбит – олигоклаз); ◆ микроклин; ◆ кальцит

Таким образом, выбор катионного ПАВ – группы четвертичного аммониевого соединения обоснован отрицательным зарядом поверхности заполнителя, изменением гидрофильно-гидрофобных и ионообменных свойств песка, что положительно отражается на зоне контакта «вяжущее – заполнитель», процессах формирования структуры и прочности мелкозернистого композита.

В качестве вяжущего в эксперименте применяли портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н который в целях экономии и улучшения технических показателей заменяли в определенных долях минеральной добавкой. В качестве добавки использовали

микрокремнезем конденсированный неуплотненный – МК-85 (ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»). Содержание диоксида кремния в микрокремнеземе составило 92%, истинная плотность 2620 кг/м³, удельная поверхность $S_{уд} = 2030 \text{ м}^2/\text{кг}$. Для определения оптимальной дозировки микрокремнезема, были изготовлены составы вяжущих композиций, в который варьировалось содержание добавки микрокремнезема. В составе 5 использовался портландцемент, подвергнутый совместному домолу с порошкообразным суперпластификатором Полипласт СП-1. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства модифицированных вяжущих материалов

№	Состав вяжущего, масс., %			НГЦТ, %	Предел прочности, в возрасте 28 суток, МПа		Сроки схватывания, час. – мин.	
	ПЦ	МК	СП		сжатие	изгиб	начало	конец
1	100	–	–	25,0	46,5	6,2	2–50	3–40
2	95	5	–	25,6	52,6	6,5	2–40	3–35
3	92	7	–	28,0	55,2	7,0	2–30	3–30
4	80	10	–	28,7	48,1	6,4	2–34	3–36
5	94*	5	1	23,4	60,2	7,5	3–00	4–05

Примечание: ПЦ – портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н; МК – микрокремнезем; СП – порошкообразный суперпластификатор Полипласт СП-1; состав № 5* использовали портландцемент, домолотый совместно с Полипласт СП-1 в дозировке 1% от массы цемента, удельная поверхность $S_{уд} = 430 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Использование добавки микрокремнезема (5 %) в комплексе с домолотым цементом и суперпластификатором Полипласт СП-1 позволило на 29,5 % увеличить прочность модифицированного вяжущего, что соответствует классу бетона В45 при стандартном коэффициенте вариации. Модифицированное добавкой микрокремнезема в количестве 7 % вяжущее показало положительный прирост (18,7 %) прочности – 55,2 МПа. Положительному эффекту в обоих случаях способствовала добавка микрокремнезема, улучшились свойства цементного теста и камня. Микрокремнезем представлен мельчайшими частицами аморфизированного стекла размерностью до 0,1–0,2 мкм, которые обладают повышенной растворимостью и гидравлической активностью (до 300 мг поглощения СаО из раствора на 1 г добавки) [11, 13]. Частицы микрокремнезема связывают продукты гидратации алита и белита – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием дополнительного количества труднорастворимых низкоосновных гидратов силиката кальция [14, 18, 21]. Сферические микрочастицы покрывают зерна компонентов смеси, создавая тем самым пластифицирующий эффект, заполняют межзерновое пространство и улучшают адгезию в зоне «вяжущее – заполнитель». С повышением дозировки микрокремнезема до 10 % наблюдается уменьшение прочности це-

ментного камня, что объясняется снижением водородного показателя щелочной среды с pH 14 до pH 12,5, с дальнейшей частичной нейтрализацией катализатора процессов гидратации – гидроксида кальция.

Состав 5 вяжущей композиции с использованием портландцемента домолотого с Полипластом СП-1 показал высокие показатели по прочности. Снижение нормальной густоты цементного теста составило 7%, сроки схватывания практически не изменились, однако дополнительные затраты на домол не оправдываются 8% увеличения прочности. Таким образом, вяжущая композиция с дозировкой микрокремнезема 7% наиболее выгодная с экономической и с технической стороны, прочность цементного камня на сжатие составляет – 55,2 МПа, на изгиб – 7 МПа. Полученная композиция имеет оптимальные сроки схватывания: начало – 2 часа 30 минут, конец – 3 часа 30 минут. С использованием вяжущего этой рецептуры и фракционированного заполнителя (высев: мелкий песок = 66:34), подвергнутого поверхностной активации были изготовлены образцы кубики из мелкозернистого бетона, которые после распалубки хранили в нормально-влажностных условиях ($t = 22 \pm 0,5^\circ\text{C}$, $\phi = 90\%$) до испытания. Рецептуры и свойства мелкозернистых бетонов на основе активированного заполнителя представлены в таблице 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства мелкозернистого бетона на активированном заполнителе

№ состава	Расход материалов на 1м³, кг						В/Ц	Предел прочности при сжатии, R _{сж} , МПа	Предел прочности при изгибе, R _{из} , МПа	Модуль упругости E _б ·10³, МПа
	вяжущее		фракционированный заполнитель			Вода				
	ПЦ	МК	В	П	АДБАХ					
1	550	–	1023	527	–	225	0,41	41,3	6,1	28,1
2	512	38	1023	527	–	204	0,40	45,0	6,4	31,2
3	550	–	1550	–	0,55	192	0,35	42,7	6,2	29,7
4	550	–	–	1550	0,55	220	0,40	42,0	6,0	29,1
5	512	38	1023	527	0,55	164	0,32	59,7	6,7	38,5
6	523*	27	1023	527	0,55	152	0,29	68,4	7,8	40,6

Примечание: ПЦ – портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н; МК – микрокремнезем; АДБАХ – алкилдиметилбензиламинный хлорид в дозировке 0,1 % от массы цемента; В – высевки; П – кварцевый мелкий песок; состав 6* использовали портландцемент, домолотый совместно с Полипласт СП-1 в дозировке 1 % от массы цемента, удельная поверхность $S_{уд} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$.

Проведенные исследования подтвердили эффективность предлагаемой технологии получения мелкозернистых бетонов на основе поверхностно обработанного добавкой АДБАХ фракционированного заполнителя и использовании микрокремнезема техногенного происхождения. Результаты исследований позволяют пронаблюдать картину изменения физико-механических свойств от варьирования состава бетона, вида заполнителя и способов модификации. Мелкозер-

нистые бетоны с использованием цемента, домолотого совместно с Полипласт СП-1 в дозировке 1 % от массы, микрокремнезема и поверхностно-активированного заполнителя показали максимальный прирост прочности на 65 %, модуль упругости возрос примерно на 42 %.

Состав 5 с 7 % микрокремнезема по массе и модифицированным заполнителем показал увеличение прочности на 44 %. Природа, гранулометрия, свойства заполнителя вносят определённые

ный вклад в формирование свойств. Так использование мелкого кварцевого песка или высевок техногенного происхождения по отдельности без фракционирования (составы 3, 4), отрицательно сказалось на физико-механических свойствах бетона. Причина кроется в ряде факторов, таких как повышенная пустотность заполнителя, увеличение водопотребности бетонной смеси, поровой структуры и проницаемости бетонного камня, что, в итоге, отражается на прочности и долговечности композита. Несмотря на дополнительные затраты на помол, использование портланд-цемента, домолотого совместно с Полипласт СП-1 в дозировке 1 % от массы цемента (состав 6) способствовало максимальному приросту прочности на 65 %. Данный результат достигнут комплексным взаимодействием модифицированного фракционированного заполнителя, вяжущего низкой водопотребности, микрокремнезема и суперпластификатора.

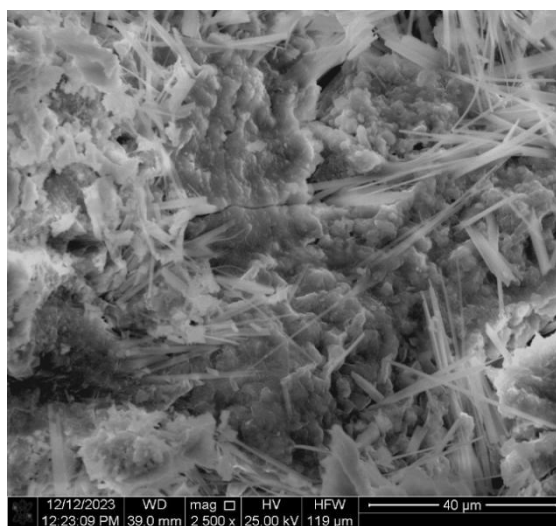
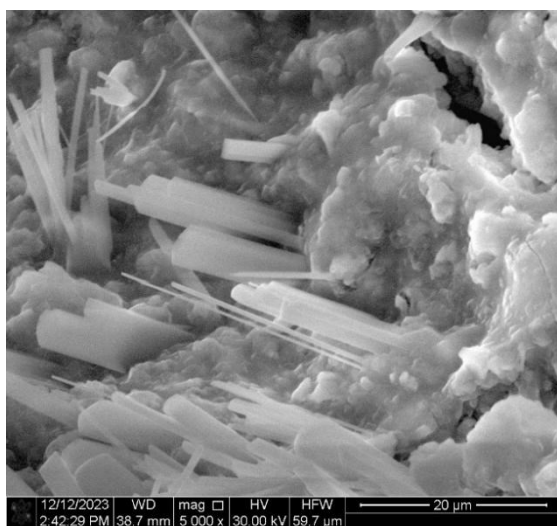


Рис. 2. Микрофотографии контактной зоны «вяжущее – поверхностно-обработанный фракционированный заполнитель»

Результаты микроанализа показали, что в контактной адгезионной зоне присутствуют разросшиеся кристаллы игольчатой формы гидро-сульфоалюминатов и гидроалюминатов кальция, пластинчатых кристаллогидратов алюмосиликатов кальция и трещиноватых агрегатов гидросиликатов кальция. Преобладание указанных соединений в контактной зоне свидетельствует о высокой прочности в переходной зоне «цементная матрица – заполнитель» и прочности мелкозернистого бетона в целом. Спектрограмма (рис. 3) подтверждает присутствие в зоне контакта таких прочных и труднорастворимых соединений как гидраты силикатов кальция, гарантирующих эксплуатационную надежность и долговечность композита.

Таким образом, предлагаемый в работе технологический прием, заключающийся в органо-минеральном модифицировании вяжущей системы и фракционированного заполнителя, позволяет обеспечить положительное влияние на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона. И в большей мере это заслуга поверхностно-обработанного катионоактивным алкилдиметилбензиламмоний хлоридом обогащенного заполнителя – за счет усиления адгезионных сил в зоне контакта «вяжущее – заполнитель», достигается значительный прирост прочности мелкозернистого бетона. В качестве подтверждения была исследована контактная зона «вяжущее – модифицированный заполнитель» состава 5 мелкозернистого бетона. На рисунке 2 представлены микрофотографии, увеличения 2500 и 5000 крат, пробы отобранной в зоне адгезии, изучались на растровом электронном микроскопе Quanta 3D 200i, полученные спектры обрабатывались при помощи программного ресурса EDAX TEAM (рис. 2).

Выводы. Комплексная реализация следующих мероприятий: фракционирование заполнителя в сочетании с активацией его поверхности катионной добавкой алкилдиметилбензиламмоний хлорида, модификация микрокремнеземом вяжущего, способствовало усилению адгезионной прочности в зоне контакта «матрица – заполнитель» и формированию плотной структуры, сложенной из высокопрочных и труднорастворимых образований. Предлагаемая технология получения мелкозернистых бетонов позволит создавать качественные композиты с использованием техногенного сырья, решая тем самым проблемы экологического характера и дефицита пригодных для строительства крупных природных песков.

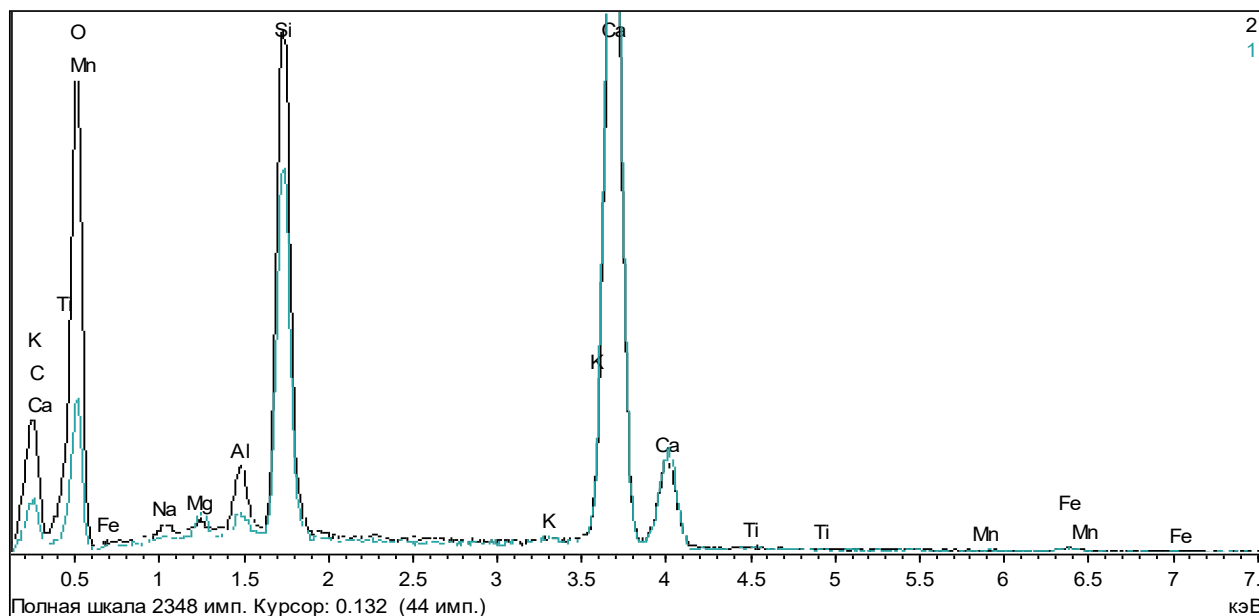


Рис. 3. Спектрограмма участков контактной зоны с присутствием гидратов силиката кальция

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-69-00043, <https://rscf.ru/project/24-69-00043>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Травуш В.И., Кузеванов Д.В., Каприелов С.С., Волков Ю.С. Бетон как экологический фактор снижения углеродного следа в среде обитания // Бетон и железобетон. 2022. № 3 (611). С. 10–14.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов // Строительные материалы. 2022. № 10. С. 41–51.
3. 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.
4. Strokova V.V., Nikulina M.V., Baskakov P.S., Abzalilova A.V., Esina A.Y. Influence of a hydrophobic emulsion on the surface properties of coatings of water-dispersion acrylic paint. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1040. Pp. 165–171.
5. Маилян Д.Р., Несветаев Г.В., Коллеганов Н.А. К определению трещиностойкости железобетонных балок из различных видов бетонов // Инженерный вестник Дона. 2023. № 1(97). С. 533–548.
6. Cherpurnenko A.S., Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Yazyev B.M. Simplified model for determining the stress-strain state in massive monolithic foundation slabs during construction // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18 (3). Pp. 126–136.
7. Lesovik V.S., Popov D.Yu., Fediuk R.S., Usanova K.Iu. Composite binders with superabsorbent polymers // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023 (3(108)). 10803.
8. Alaskhanov A.Kh., Lesovik V.S., Tolstoy A. «Green» composites based on technogenic raw materials // AIP Conference Proceedings. 2023. Pp. 153–158.
9. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны // Москва: Ассоциация строительных вузов. 2006. 289 с.
10. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 20–24.
11. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. Т. 46. № 2. С. 65–70.
12. Каприелов С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 9–13.
13. Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Муртазаева Т.С-А., Хубаев М.С-М. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы // Инновации и инвестиции. 2015. № 8. С. 159–163.
14. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Алиев С.А., Бисултанов Р.Г. Горные породы вулканического происхождения как заполнители для

получения легких бетонов // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 105–113.

15. Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г., Мовсулов М.М. Перспективные возможности получения качественных мелкозернистых композитов // Научно-технический журнал Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX. № 2(32). С. 94–101.

16. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Корянова Ю.И. Разработка полиморфной вяжущей системы на основе карбонатной добавки // Научно-технический журнал Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX. № 3(33). С. 96–103.

17. Yang J., Qu D., Hu J., Song L., Cheng B. Research on singular value detection method of concrete dam deformation monitoring. Measurement. 2021. Vol. 179. 109457.

18. Chen J., Jia Q., Xu S., Fan P., The PDEM-based time-varying dynamic reliability analysis

method for a concrete dam subjected to earthquake. Structures. 2021. Vol. 33. Pp. 2964–2973.

19. Gowripalan N., Shakor P., Rocker P. Pressure exerted on formwork by self-compacting concrete at early ages: A review. Case Studies in Construction Materials. 2021. Vol. 15. 00642.

20. Dong W., Li W., Tao Z. A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 172. 105664.

21. Bondarev B.A., Borkov P.V., Bondarev A.B. An Outlook on the Application of Glass-Reinforced Plastic and Polymer Concrete Components in Bridge Construction // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016), Chelyabinsk, May 19–20, 2016. Chelyabinsk: Elsevier Ltd, 2016. Pp. 1617–1622. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.139

Информация об авторах

Муртазаев Саид-Альви Юсупович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства E-mail: s.murtazaev@mail.ru. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова. Россия, 364051, Грозный, пр. Исаева, 100.

Саламанова Мадина Шахидовна, доктор технических наук, доцент, директор научно-технического центра коллективного пользования «Современные строительные материалы и технологии». E-mail: madina_salamanova@mail.ru. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова. Россия, 364051, Грозный, пр. Исаева, 100. Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук. 364051, Россия, Чеченская Республика, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское шоссе), 21 а

Поступила 25.03.2024 г.

© Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., 2024

¹Murtazaev S.-A. Yu., ^{1,2,*}Salamanova M.Sh.

¹Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences

*E-mail: madina_salamanova@mail.ru

TECHNOLOGICAL APPROACHES TO IMPROVING THE QUALITY OF FINE-GRAIN CONCRETE

Abstract. The production of high quality and reliable fine-grained concrete using resource-saving technologies is a current and important task. The popularity of fine-grained concrete is determined by the possibility of eliminating coarse aggregate. It is expensive and in short supply in many regions of the country, and the ability to regulate within a wide range the structure and technical properties of the concrete mixture and concrete, by the quality of concreting of densely reinforced structures of complex configuration, increasing the impact strength of reinforced concrete elements. In this regard, to increase the demand for this product, research is carried out on the production of fine-grained concrete using locally available technogenic materials and technical methods based on established patterns of influence of recipe and technological parameters on physical, mechanical and operational characteristics. The lack of high-quality coarse sands in the region was a prerequisite for the search for new solutions to control the processes of contact formation between cement particles and fine aggregate. The recipe-technological method proposed in the work, which consists in the complex use of fractionated filler surface activated by the cationic additive of alkyl dimethylbenzyl ammonium chloride, modified with microsilica binder, contributed to the enhancement of adhesive strength in the contact zone “cement stone-aggregate” and the formation of a dense structure composed of high-strength and

poorly soluble formations. The proposed technology for producing fine-grained concrete will make it possible to create high-quality composites using technogenic raw materials, thereby solving the problem of the shortage of coarse natural sands suitable for construction.

Keywords: *fine-grained concrete, fractionated filler, composite binders, surface treatment, cationic development, microsilica*

REFERENCES

1. Travush V.I., Kuzevanov D.V., Kaprielov S.S., Volkov Yu.S. Concrete as an environmental factor in reducing the carbon footprint in the environment [Beton kak ekologicheskij faktor snizheniya uglerodnogo sleda v okruzhayushchej srede obitaniya]. Concrete and reinforced concrete. 2022. No. 3(611). Pp. 10–14. (rus)
2. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A. Optimization of concrete technology parameters to ensure thermal crack resistance of massive foundations [Optimizaciya parametrov tekhnologii betona dlya obespecheniya termicheskoy treshchinostjosti massivnyh fundamentov]. Building materials. 2022. No. 10. Pp. 41–51. (rus)
3. 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 svojstva samouplotnyayushchegosya betona s ispol'zovaniem kompleksa modifikatorov]. Building materials. 2021. No. 12. Pp. 48–54. (rus)
4. Strokova V.V., Nikulina M.V., Baskakov P.S., Abzalilova A.V., Esina A.Y. Influence of a hydrophobic emulsion on the surface properties of coatings of water-dispersion acrylic paint. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1040. Pp. 165–171.
5. Mailyan D.R., Nesvetaev G.V., Kolleganov N.A. To determine the crack resistance of reinforced concrete beams made from various types of concrete [K opredeleniyu treshchinostjosti zhelezobetonnnyh balok iz razlichnyh vidov betonov]. Engineering Bulletin of the Don. 2023. No. 1(97). Pp. 533–548. (rus)
6. Chepurnenko A.S., Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Yazyev B.M. Simplified model for determining the stress-strain state in massive monolithic foundation slabs during construction. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18 (3). Pp. 126–136.
7. Lesovik V.S., Popov D.Yu., Fediuk R.S., Usanova K.Iu. Composite binders with superabsorbent polymers. Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol. 3(108). 10803.
8. Alaskhanov A.Kh., Lesovik V.S., Tolstoy A. «Green» composites based on technogenic raw materials. AIP Conference Proceedings. 2023. 153–158.
9. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high quality concrete [Modificirovannye vysokokachestvennye betony]. Moscow: Association of Construction Universities. 2006. 289 p. (rus)
10. Kalashnikov V.I. The industry of non-metallic building materials and the future of concrete [Promyshlennost' nerudnyh stroitel'nyh materialov i budushchee betonov concrete]. Construction Materials. 2008. No. 3. Pp. 20–24. (rus)
11. Murtazaev S.A. Yu., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated aluminosilicate raw materials [Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoj prirody]. Volga Scientific Journal. 2018. Vol. 46. No. 2. Pp. 65–70. (rus)
12. Kaprielov S.S. Modified high-strength concrete of classes B80 and B90 in monolithic structures. [Modificirovannye vysokoprochnye betony klassov V80 i V90 v monolitnyh konstrukciyah]. Building materials. 2008. No. 3. Pp. 9–13. (rus)
13. Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Murtazaeva, T.S.-A., Khubaev M.S.-M. High-quality modified concrete based on mineral additives and superplasticizers of various natures [Vysokokachestvennye modificirovannye betony na osnove mineral'nyh dobavok i superplastifikatorov razlichnoj prirody]. Innovation and investment. 2015. No. 8. Pp. 159–163. (rus)
14. Murtazaev S.A. Yu., Salamanova M.Sh., Aliev S.A., Bisultanov R.G. Rocks of volcanic origin as fillers for producing lightweight concrete [Gornye porody vulkanicheskogo proiskhozhdeniya kak zapolniteli dlya polucheniya legkih betonov]. Scientific review. 2015. No. 7. Pp. 105–113. (rus)
15. Salamanova M.Sh., Bisultanov R.G., Movsulov M.M. Promising opportunities for producing high-quality fine-grained composites [Perspektivnye vozmozhnosti polucheniya kachestvennyh melkozernistykh kompozitov]. Scientific and technical journal Messenger GSTOU. Technical science. 2023. Volume XIX. No. 2(32). Pp. 94–101. (rus)
16. Murtazaev S.-A. Yu., Salamanova M.Sh., Koryanova Yu.I. Development of a polymorphic binder system based on a carbonate additive [Razrabotka polimorfnoj vyazhushchej sistemy na osnove karbonatnoj dobavki]. Scientific and technical journal Messenger GSTOU. Technical science. 2023. Volume XIX. No. 3(33). Pp. 96–103. (rus)
17. Yang J., Qu D., Hu J., Song L., Cheng B. Research on singular value detection method of concrete dam deformation monitoring. Measurement. 2021. Vol. 179. 109457.
18. Chen J., Jia Q., Xu S., Fan P., The PDEM-based time-varying dynamic reliability analysis

method for a concrete dam subjected to earthquake. Structures. 2021. Vol. 33. Pp. 2964–2973.

19. Gowripalan N., Shakor P., Rocker P. Pressure exerted on formwork by self-compacting concrete at early ages: A review. Case Studies in Construction Materials. 2021. Vol. 15. 00642.

20. Dong W., Li W., Tao Z. A comprehensive review on performance of cementitious and geopol-

ymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 172. 105664.

21. Bondarev B.A., Borkov P.V., Bondarev A.B. An Outlook on the Application of Glass-Reinforced Plastic and Polymer Concrete Components in Bridge Construction. 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016), Chelyabinsk, May 19–20, 2016. Chelyabinsk: Elsevier Ltd, 2016. Pp. 1617–1622. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.139

Information about the authors

Murtazaev, S-A.Yu. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Production Technology. E-mail: s.murtazaev@mail.ru. Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikova. Russia, 364051, Grozny, Isaeva Ave., 100.

Salamanova, Madina Sh. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Technical Center for Collective Use «Modern Building Materials and Technologies». E-mail: madina_salamanova@mail.ru. Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikova. Russia, 364051, Grozny, Isaeva Ave., 100. Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences. 364051, Russia, Chechen Republic, Grozny, V. Alieva (Staropromyslovskoe highway), 21 a.

Received 25.03.2024

Для цитирования:

Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш. Технологические подходы к повышению качества мелкозернистого бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-40-48

For citation:

Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh. Technological approaches to improving the quality of fine-grain concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-40-48

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-49-59

Тимофеев П.С.

Сибирский государственный университет путей сообщения

E-mail: pao.t@yandex.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЗЛА МОНОЛИТНОГО БЕЗБАЛОЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ СО СТАЛЕБЕТОННОЙ КОЛОННОЙ, С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕЗНОГО БАЛОЧНОГО УЗЛА, С УЧЕТОМ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ БЕТОНА И СТАЛИ

Аннотация. Представленное исследование проводит глубокий анализ работы узла монолитного безбалочного перекрытия, взаимодействующего со сталебетонной колонной с применением срезного балочного узла. С использованием метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS создается подробная геометрическая модель конструкции, что позволяет провести комплексное численное моделирование. Основное внимание уделяется изучению взаимодействия между бетоном и сталью в конструкции, а также передаче усилий через срезной узел. Полученные результаты включают детальную оценку распределения напряжений и деформаций в различных частях конструкции, что способствует более глубокому пониманию механического поведения системы в целом. Целью исследования является не только анализ эффективности применения срезного узла для обеспечения прочности и устойчивости перекрытия, но и выработка практических рекомендаций по оптимизации дизайна с целью улучшения взаимодействия материалов и повышения надежности строительных объектов. Представленное исследование важно для инженеров и проектировщиков, стремящихся к совершенствованию процессов проектирования и строительства в современной индустрии, а также для разработчиков нормативных документов в области строительства и инфраструктуры. Результаты исследования могут применяться при разработке новых технологий в строительстве.

Ключевые слова: монолитное безбалочное перекрытие, сталебетонная колонна, срезной балочный узел, численный анализ, метод конечных элементов (FEM), напряжения и деформации.

Введение. Целью численного исследования является проведение подробного сравнения расчетных параметров перекрытия, опирающегося на сталебетонные колонны при помощи балочного срезного узла (БСУ), и стандартного решения узла монолитного безбалочного перекрытия. Исследование включает в себя анализ параметров трещинообразования, деформаций и напряжений в арматурных стержнях для двух рассматриваемых случаев [1, 2].

С учетом все более широкого использования программных средств для расчета и проектирования, в данной работе проведено сравнение результатов, полученных с использованием программного комплекса Ansys и Autodesk Robot. Это позволяет убедиться в надежности и сопоставимости результатов при использовании различных инструментов для численного моделирования [3].

Данное исследование особенно актуально в контексте возведения высотных зданий, где возникают особые проблемы с конструктивной схемой. В современной практике строительства все чаще требуется реализация уникальных архитектурных концепций, предполагающих создание зданий с нестандартными формами и сложными геометрическими характеристиками. В связи с этим необходимо обеспечить строительство таких высотных зданий с использованием полного сталебетонного каркаса [4].

Следовательно, данное исследование не только призвано углубить наше понимание характеристик перекрытий с использованием срезного балочного узла, но также предоставить ценную информацию для проектировщиков и инженеров, способствуя оптимизации конструкций и повышению их надежности [5].

Методология. За основу расчета было взято монолитное трехпролетное перекрытие толщиной 250 мм и габаритами 8000×8000 мм (рис. 1, 2). Перекрытие опирается на железобетонные колонны габаритами 600×600 мм. В случае модели с БСУ присутствует металлический сердечник из прокатного двутаврового профиля.

Для разгрузки пролетов от дополнительных моментов и уменьшения деформаций в схеме перекрытия присутствуют консольные вылеты с каждой из сторон. Так же наличие консольных вылетов позволит избежать необходимости проведения дополнительного анализа перекрытий на продавливание крайними колоннами [6–8].

Описание моделирования в Ansys. Предпроцессором для моделирования геометрической модели являлся комплекс информационного моделирования Autodesk Revit. Данный комплекс позволяет максимально подробно составить элементную геометрическую модель конструкции с учетом арматурных стержней и дополнительных элементов, учитываемых в численном исследовании.

Для системы перекрытия с БСУ геометрические параметры узла были смоделированы в геометрии тела с назначением характеристик стали С345 по билинейной модели деформирования [8].

В монолитном перекрытии были реализованы вырезы по форме всех элементов профиля, для более полного геометрического соответствия идеализированной модели реальной конструкции.

Элементы балочного срезного узла выполнены из спаренных прокатных профилей С12, длиной 1010 мм. Для увеличения жесткостных характеристик данных элементов по верхней грани к ним приварена квадратная пластина с вершинами, расположенными на осях данных балочных элементов, толщиной 6 мм со стороной ребра 960 мм. Балочные элементы узла привариваются к стенкам колонны в одном направлении, а также к пластинам, заранее приваренным к торцам стенок колонны в другом [8].

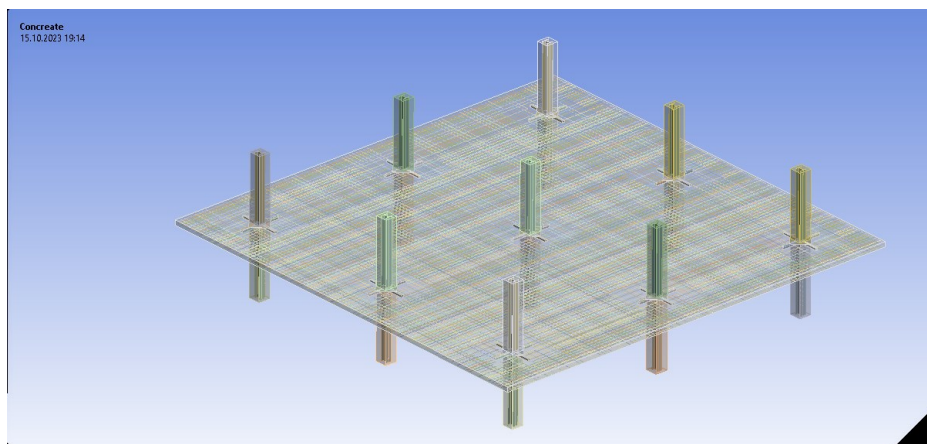


Рис. 1. Расчетная схема перекрытия с балочными срезными узлами в расчетной среде Ansys

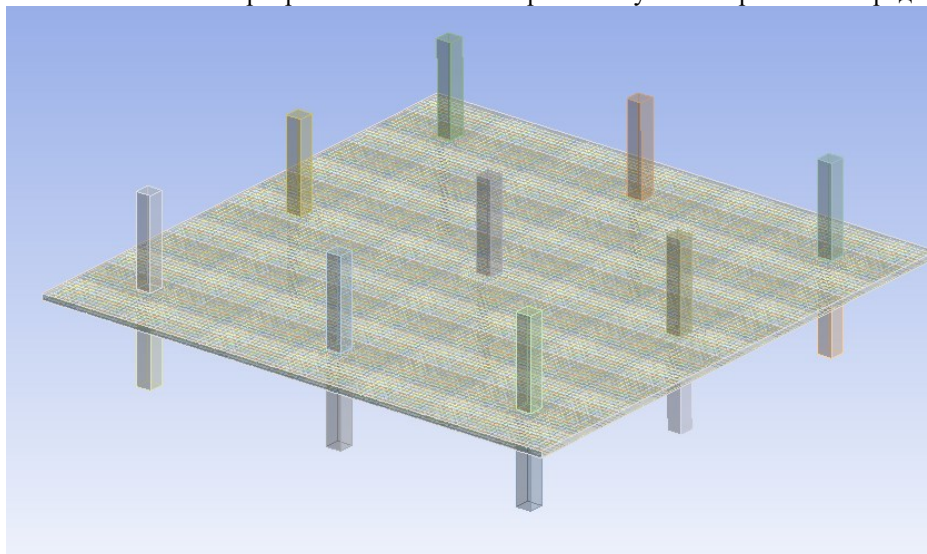


Рис. 2. Расчетная схема безбалочного монолитного перекрытия в расчетной среде Ansys

В качестве нагрузки на перекрытие была принята усредненная нагрузка на перекрытие общественного здания. В общем случае при расчете по первой группе предельных состояний данная нагрузка учитывает вес напольного покрытия, нагрузки от перегородок и полезные нагрузки с учетом требований актуализированных нормативных документов составляющими в сумме 13 кПа [9].

Для моделирования поэтапного нагружения и расчета геометрической нелинейности нагрузки использовался метод пошагового нагружения с минимально возможным количеством

подшагов равным 10 и максимальным равным 250.

Для определения прогибов и определения картины трещинообразования расчетные значения нагрузок были учтены с коэффициентом надежности, равным 1,0 [9].

Каждая колонна была ограничена по высоте предполагаемой высотой этажа и закреплена снизу жесткой связью, образуя жесткий диск с перекрытием.

Расчет в Ansys для моделей с БСУ и классического безбалочного перекрытия проводился в нелинейной постановке с учетом геометрической

и физической нелинейности. Для учета геометрической нелинейности использовался метод поэтапного нагружения конструкции, физическая нелинейность учитывалась с помощью нелинейной модели деформирования материала [10, 11].

Для моделирования нелинейности поведения бетона и более точного определения возможностей перекрытия воспринимать и перераспределять нагружения была принята модель деформирования Дрюкера-Праггера со следующими параметрами:

- коэффициент прочности (σ_c): представляет собой предел прочности бетона в сжатии. Этот параметр определяет, при каких значениях нормальных напряжений в бетоне начинается пластическое деформирование;

- коэффициент сдвиговой прочности (τ_{res}): определяет предел сдвиговой прочности бетона. Он играет важную роль в моделировании сдвиговых деформаций и разрушения бетона.

Параметры для описания деформации бетона и стали:

- модуль упругости бетона (E_c): значение описывает жесткость бетона в упругой области. Он определяет, как бетон деформируется под воздействием нормальных напряжений в упругой фазе;

- коэффициент Пуассона бетона (ν_c): параметр описывает связь между продольными и поперечными деформациями бетона. Величина обычно близка к 0.2;

- модуль упругости стали (E_s): значение описывает жесткость стали, которая используется для армирования сталебетонных конструкций [12–14].

Моделирование в Autodesk Robot Structural. Для предварительного определения необходимой сетки армирования была создана расчетная модель в расчетном комплексе Robot Structural. Данный расчетный комплекс был выбран благодаря его способности проводить анализ и проектирование различных инженерных конструкций, включая сталебетонные элементы [15]. Важные возможности программного комплекса:

- комбинированные сталебетонные сечения;
- нелинейные расчеты, включая пластичность материалов и большие деформации;
- учет динамических нагрузок, таких как сейсмические и ветровые нагрузки;
- оценка безопасности и структурной надежности;
- визуализация результатов и создание отчетов.

Конечно-элементная модель с БСУ представляет собой классическую систему монолитного безбалочного перекрытия, опирающегося на колонны 600×600 мм с сердечником из прокатного профиля.

Балочный срезной узел был выполнен балками составного сечения, расположенными в теле плиты перекрытия. Для избежания повышенных значений усилий в местах пересечения жесткостей колонн и перекрытия вводились абсолютно жесткие тела (рис. 3).

Расчет проводился с учетом геометрической нелинейности по методу Ньютона-Рафсона, с пошаговым приращением нагрузки [16].

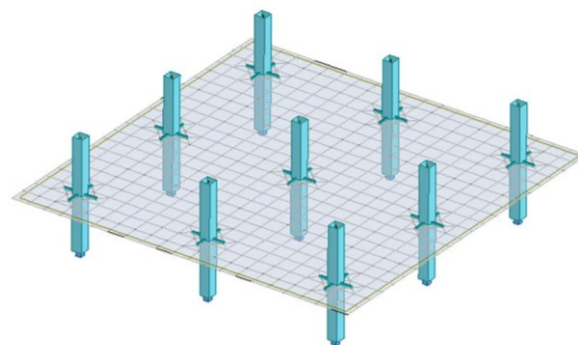


Рис. 3. Расчетная схема перекрытия с балочными срезными узлами в расчетном комплексе Robot structural

Результаты. Представление расчетных результатов для перекрытия балочными срезными узлами в расчетном комплексе Robot structural.

Важным элементом анализа данной модели являются параметры трещинообразования. После МКЭ-расчета конструкции и определения теоретической площади армирования, а также расчетов предельного состояния жесткости для каждого конечного элемента (КЭ), коэффициенты жесткости оцениваются в программе. Эти коэффициенты рассчитываются для двух направлений армирования, и в итоге для каждого КЭ получаются два значения жесткости. Для дальнейших расчетов используется взвешенное среднее значение жесткости, учитывая весовой коэффициент, который зависит от отношения моментов, действующих на КЭ в обоих направлениях.

Исходя из этого, можно предположить, что средневзвешенный приведенный коэффициент жесткости перекрытия отражает картину трещинообразования в элементах по одному из направлений действия основного момента (рис. 4, 5) [15].

По результатам расчета перекрытия в Robot Structural, с заданным значением армирования, соответствующим армированию, принятому в модели Ansys, получены максимальные значения прогибов в 77 мм рис. 6.

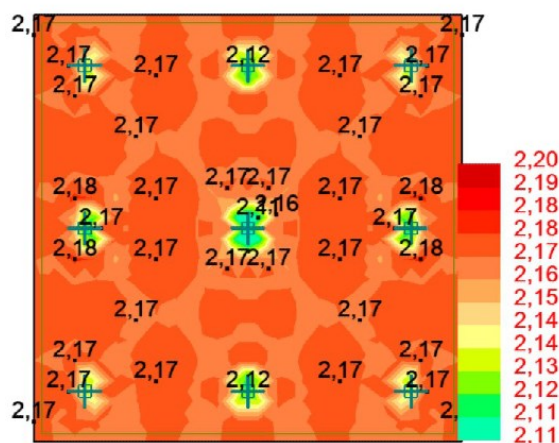


Рис. 4. Коэффициент жесткости перекрытия в направлении X в верхнем слое

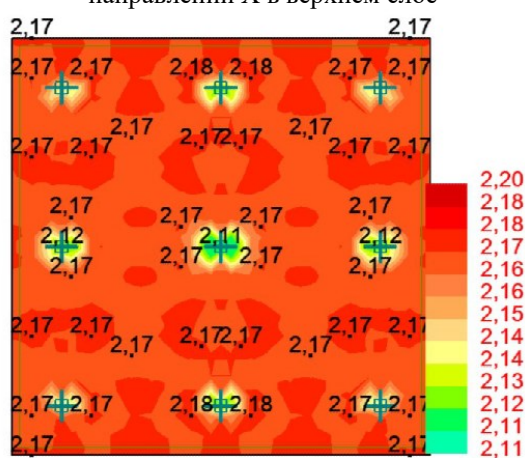


Рис. 5. Коэффициент жесткости перекрытия в направлении Y

Представление расчетных результатов для перекрытия с балочным срезным узлом в программной среде Ansys. На рис. 7 представлена картина пластических деформаций железобетон-

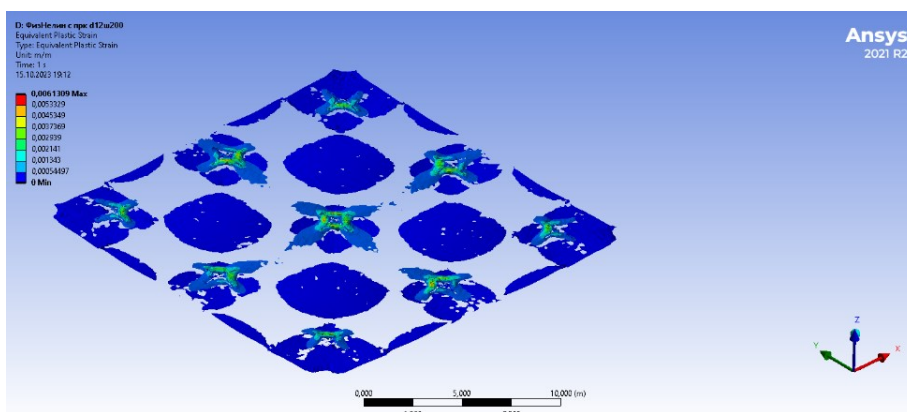


Рис. 7. Картина трещинообразования, для перекрытия с балочными срезными узлами рассчитанными в программном комплексе Ansys

Максимальные значения прогибов при расчете в программной среде Ansys по второй группе предельных состояний на нормативные

ного перекрытия с БСУ. Данная картина трещинообразования схожа с проведенным ранее опытом по предельной несущей способности элемента перекрытия. В зоне опирания перекрытия на сталебетонную колонну возникают характерные «трубы» из стохастических трещин, которые при последующем нагружении до стадии разрушения срastaются в единую трещину и по ним происходит разрушение перекрытия [19, 20].

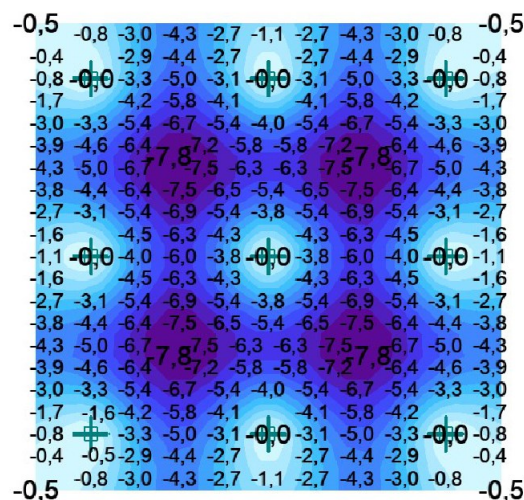


Рис. 6. Значения прогибов, рассчитанных в программном комплексе Robot Structural (см)

Так же балочные элементы БСУ выступают в роли скрытой капители из-за измененных параметров приведенной жесткости в зоне опирания и из-за перераспределения напряжений в зону увеличенной жесткости трещины в нижней зоне плиты остаются минимальными, как видно на рис. 7 [20].

Картина трещинообразования сходна с распределением J-интеграла для модели, рассчитанной в ПК Robot Structural (рис 5, 6).

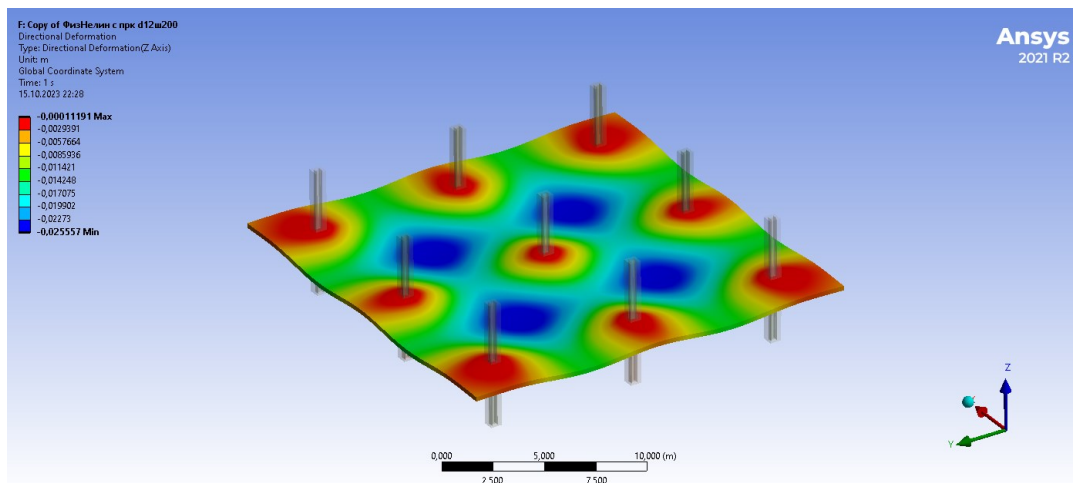


Рис. 8. Значения прогибов для перекрытия с БСУ, рассчитанных в программном комплексе Ansys

На рис. 9 представлена картина пластических деформаций для безбалочного монолитного перекрытия в классической постановке в программной среде Ansys. Данная картина трещинообразования схожа с теоретическими данными о

трещинообразовании и разрушении безбалочных перекрытий. Пластические деформации трещинообразования распределены более равномерно по объему плиты, согласно представлениям о деформации железобетонных элементов [1, 20].

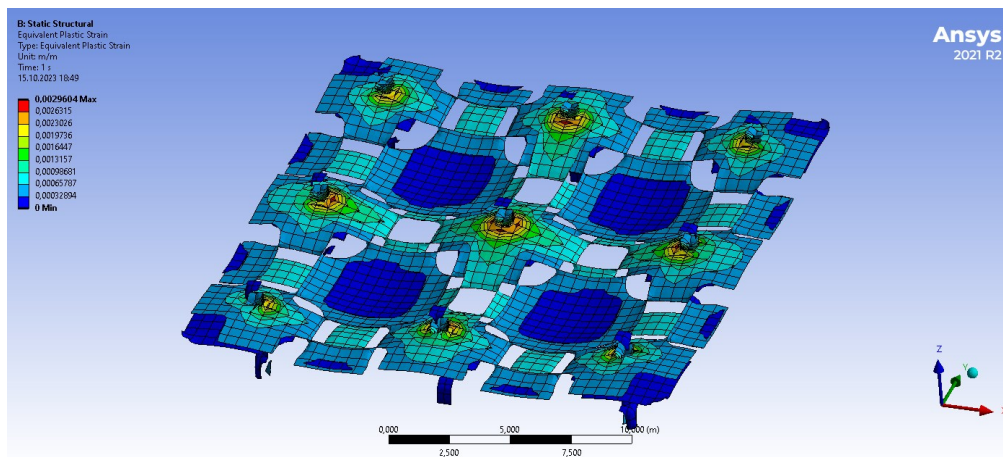


Рис. 9. Картина трещинообразования, для перекрытия безбалочных срезных узлов, рассчитанных в программном комплексе Ansys

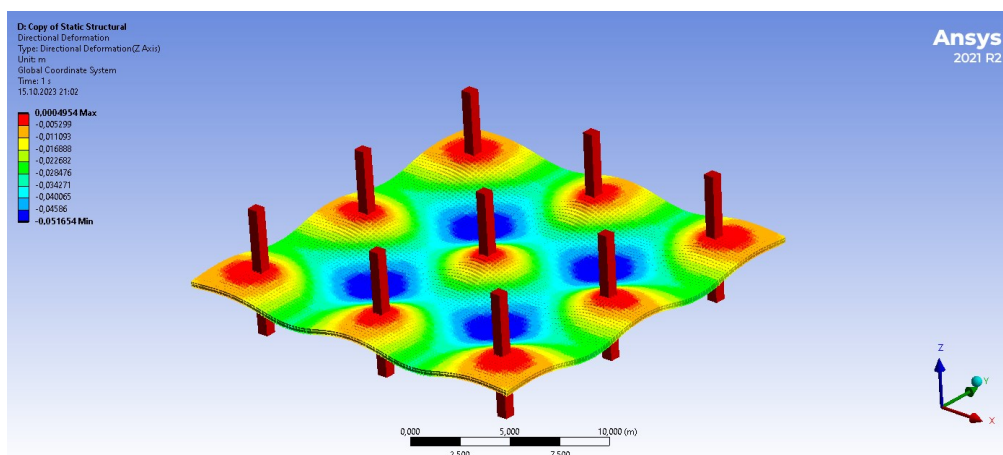


Рис.10. Значения прогибов, для перекрытия безбалочного срезного узла, рассчитанного в программном комплексе Ansys

Картины классического трещинообразования и прогибов монолитного перекрытия без рассматриваемых узлов демонстрируют характерные деформации и повреждения, возникающие в

таких конструкциях под нагрузкой. На рис. 10 представлены значения прогибов, полученные при расчете по второй группе предельных состояний. Картина представляет собой классическое

деформированное перекрытие с частичным разгрузением в зоне пролета консольными вылетами с каждой стороны.

Отсутствие безбалочных срезных узлов приводит к сосредоточению нагрузок в местах примыкания балки к колонне, что вызывает концентрацию напряжений и появление трещин. В центральной части пролета могут образовываться горизонтальные трещины, вызванные растягивающими усилиями, а вблизи опор – вертикальные трещины вследствие концентрации сжимающих напряжений, что представлено на рис. 9. Эти трещины способны постепенно распространяться, ухудшая прочность и долговечность конструкции [21].

Картина деформаций ясно иллюстрирует проблему увеличенных пролетов, характерную

для данного типа конструкций. В зоне пролета наблюдается значительное увеличение прогибов, что приводит к превышению допустимых пределов и вызывает недопустимые деформации. Прогибы в центральной части пролета указывают на недостаточную жесткость конструкции, требующую либо уменьшения пролета, либо увеличения сечения балки и количества арматуры [22].

Отсутствие узлов безбалочного срезного типа увеличивает риск локальных разрушений в зонах высокой концентрации напряжений, что снижает общую устойчивость перекрытия и требует дополнительных мер для усиления конструкции, таких как увеличение армирования или использование дополнительных поддерживающих элементов [3, 23].

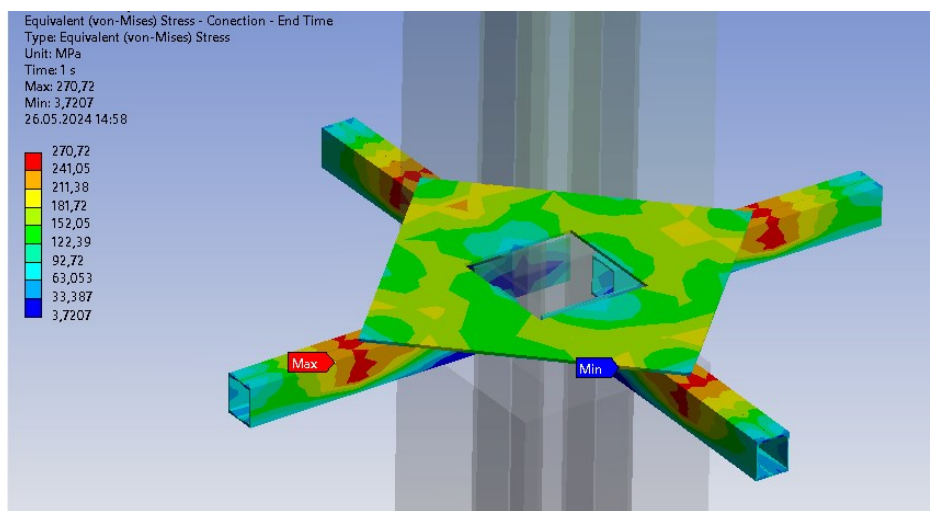


Рис. 11. Эквивалентные напряжения в балочном срезном узле (по Мизесу)

Балочный срезной узел в монолитном железобетонном перекрытии функционирует как критический компонент, перераспределяющий нагрузки и повышающий сдвиговую устойчивость конструкции. В нормальных условиях эксплуатации, когда балочные элементы еще не достигли предела текучести стали, узел эффективно распределяет напряжения между балкой и колонной. Металлические элементы балочного срезного узла работают в пределах упругой деформации, обеспечивая равномерное распределение сдвиговых и нормальных усилий, предотвращая локальные концентрации напряжений и возможные трещинообразования в бетоне [3, 23].

Однако, когда напряжения в балочных элементах достигают предела текучести стали, начинается процесс пластической деформации, как показано на рис. 11. На этом этапе металлические компоненты балочного срезного узла начинают пластически деформироваться, что приводит к перераспределению нагрузок внутри узла. Пла-

стическая деформация стали позволяет узлу поглощать дополнительную энергию и замедляет прогрессирующее разрушение конструкции [21].

По мере того, как балочные элементы продолжают находиться в состоянии текучести, прогибы конструкции начинают увеличиваться. Это увеличение прогибов свидетельствует о переходе узла из упругого в пластическое состояние работы. Несмотря на это, балочный срезной узел продолжает выполнять свою функцию по перераспределению нагрузок, предотвращая резкое и катастрофическое разрушение. Вместо этого, процесс деформации становится более контролируемым, что дает возможность для выявления и устранения потенциальных проблем до их критического развития [8].

Когда напряжения в балочных срезных узлах достигают значений, близких к пределу текучести стали, и узлы начинают пластически деформироваться, в арматурных стержнях как в зоне пролета, так и в зоне опоры происходят важные изменения, критически влияющие на поведение

всей конструкции. В нормальных условиях эксплуатации арматурные стержни работают в упругой стадии, деформируясь пропорционально приложенным нагрузкам и возвращаясь в исходное состояние при их снятии. Однако по мере увеличения нагрузки напряжения в арматурных стержнях приближаются к пределу текучести, и

стержни начинают переходить в стадию пластической деформации, при которой деформации становятся необратимыми. В результате этого процесса в зоне пролета начинают увеличиваться прогибы плиты, так как арматура уже не способна полностью сопротивляться изгибным моментам, согласно данным на рис. 13 [6].

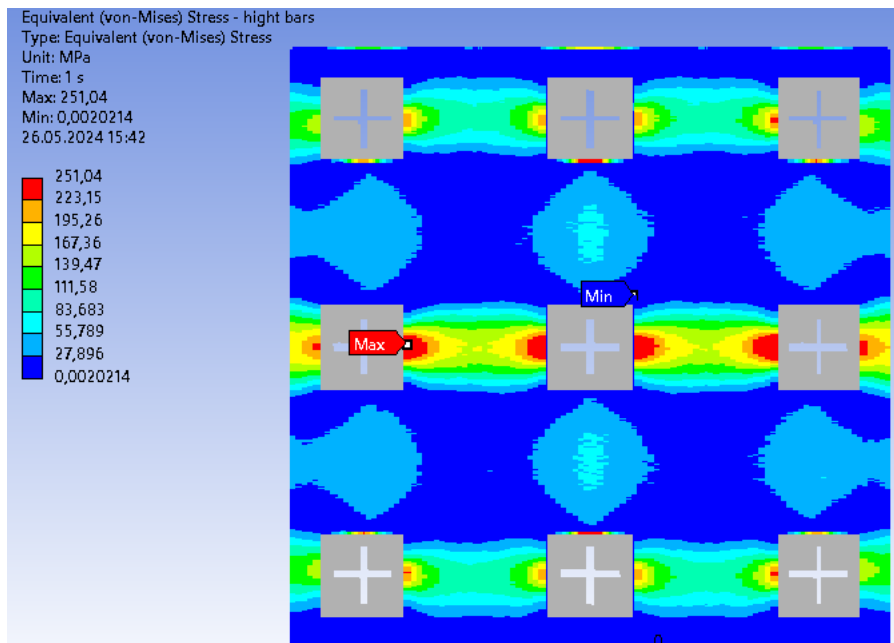


Рис. 12. Эквивалентные напряжения в стержнях верхнего слоя армирования

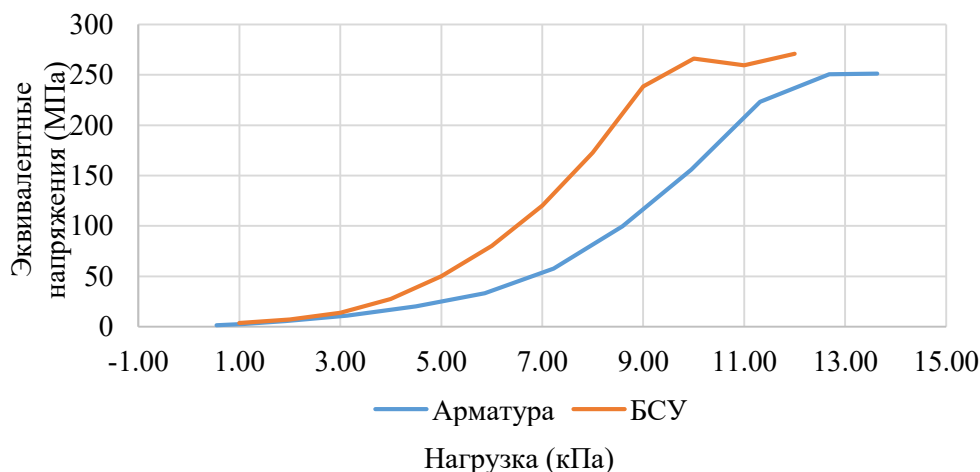


Рис. 13. График сравнения эквивалентных напряжений в балочных элементах узла и верхнем слое арматуры перекрытия

В зоне опоры арматурные стержни подвергаются высоким концентрациям напряжений из-за передачи нагрузки от плиты на колонны через БСУ. При достижении предела текучести стали арматурные стержни в зоне опоры также начинают пластически деформироваться, что приводит к перераспределению усилий в узле, так как сталь начинает «течь». Это увеличение пластической деформации вызывает увеличение прогибов и вертикальных деформаций всей конструкции,

что может повлиять на общий баланс и устойчивость плиты. Благодаря БСУ часть нагрузки перераспределяется более равномерно, что снижает риск локальных разрушений, но при этом увеличивает область пластической работы арматуры [3, 23].

Совокупное поведение системы при достижении предела текучести стали в арматурных стержнях в зоне пролета и опоры проявляется в повышении пластичности конструкции, которая приобретает способность поглощать больше

энергии за счет пластической деформации стали, что позволяет избежать внезапного разрушения. Однако это также ведет к увеличению прогибов как в пролете, так и в зоне опоры, что служит сигналом для проведения дополнительных обследований и возможного усиления конструкции. Перераспределение внутренних усилий, вызванное пластической деформацией арматуры, может временно компенсировать слабости конструкции, но требует внимательного мониторинга и возможного вмешательства для предотвращения дальнейших повреждений. Таким образом, при достижении предела текучести стали в арматурных стержнях конструкция переходит в состояние, требующее контроля деформаций и проги-

бов, а также планирования возможных мероприятий по укреплению и ремонту для обеспечения дальнейшей надежной эксплуатации [23].

При сравнении результатов расчета в программной среде Ansys перекрытия с БСУ и классического безбалочного монолитного перекрытия получены следующие результаты. В перекрытие с БСУ получен максимальный прогиб в зоне пролета величиной 40 мм. Этот результат объясняется эффективным перераспределением жесткости в зону скрытой капители, представленной балочными элементами узла. В классическом безбалочном монолитном перекрытии прогиб составил 77 мм. Результаты эксперимента показаны на рис. 14.

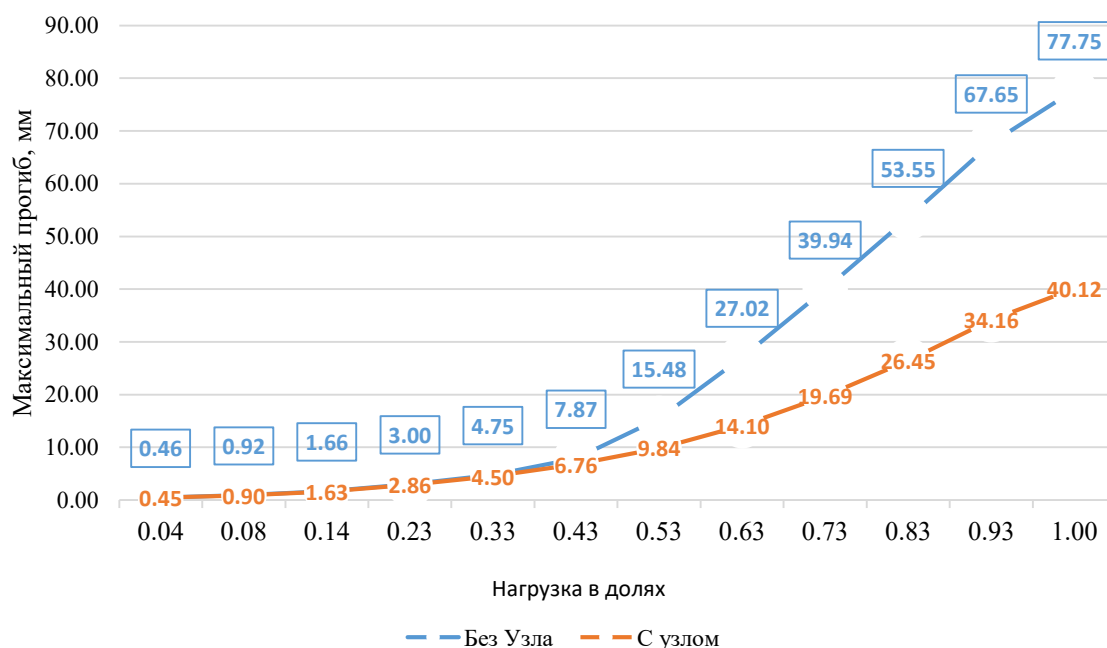


Рис. 14. График сравнения результатов

Балочный срезной узел демонстрирует значительное увеличение жесткости конструкции по сравнению с классическим балочным монолитным перекрытием. Это приводит к снижению деформаций и повышению общей надежности конструкции. Балочный срезной узел выступает в роли скрытой капители, воспринимая воздействие поперечных перерезающих плиты напряжений, позволяя оказаться от локального увеличения толщины перекрытия в приопорных зонах.

Выводы. Результаты численного эксперимента показали, что Картины деформаций и трещинообразования в монолитных железобетонных перекрытиях с балочными срезными узлами демонстрируют значительное улучшение в распределении нагрузок и устойчивости конструкции по сравнению с традиционными перекрытиями. На рис. 11 представлены значения прогибов,

полученные при расчете по второй группе предельных состояний для перекрытия, усиленного БСУ.

БСУ эффективно перераспределяют концентрированные нагрузки, которые возникают в местах примыкания балок к колоннам. Эти узлы снижают локальные напряжения, обеспечивая более равномерное распределение усилий по всей конструкции. В результате, в центральной части пролета значительно уменьшается вероятность появления горизонтальных трещин, вызванных растягивающими усилиями, и вертикальных трещин вблизи опор из-за концентрации сжимающих напряжений.

Прогибы перекрытия с БСУ существенно меньше по сравнению с традиционными конструкциями. Это связано с тем, что металлические элементы узла перераспределяют нагрузки, уменьшая деформации и предотвращая превышение допустимых пределов прогибов. Благодаря

этому, конструкция сохраняет свою жесткость и устойчивость даже при значительных эксплуатационных нагрузках.

Пластическая деформация стали в БСУ при достижении предела текучести стали позволяет узлам поглощать дополнительную энергию, предотвращая внезапное разрушение конструкции. Эта способность узлов увеличивает пластичность всей системы, позволяя ей выдерживать более высокие нагрузки без критических повреждений. Перераспределение напряжений также снижает риск локальных разрушений, что повышает общую долговечность и надежность перекрытия.

Таким образом, использование БСУ в монолитных железобетонных перекрытиях значительно улучшает их эксплуатационные характеристики. Узлы обеспечивают более равномерное распределение нагрузок, уменьшают прогибы и предотвращают образование трещин, что в совокупности повышает прочность, жесткость и долговечность конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Березовский Б.И., Евдокимов Н.И., Жадановский Б.В., Розенбойм Л.С., Широкова Л.А. Возведение монолитных конструкций зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1981. 335 с.
2. Ведяков И.И., Конин Д.В., Крылов С.Б., Семенов В.А., Крылов А.С., Рожкова Л.С. Руководство по проектированию сталежелезобетонных конструкций. СТО АРСС 11251254.001-018-4. М.: АКЦИОМГРАФИКС ЮНИОН, 2018. 114 с.
3. American Concrete Institute. Guide to the Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures. American Concrete Institute, 2020. 224 с.
4. Brendel G. Stahlbetonbau unter Berücksichtigung des Spannbetons. Строительство с использованием предварительно напряженного сталебетона. Основные положения теории и практики. Лейпциг: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1958. 350 с.
5. Джонсон Р.П. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4: проектирование сталежелезобетонных конструкций EN 1994-1-1. Москва: МИСИ-МГСУ, 2012. 413 с.
6. Bompa D.V., Elghazouli A.Y. Structural performance of RC flat slabs connected to steel columns with shear heads // Journal of Structural Engineering. 2016. Vol. 117, No. 15. Pp. 161–183.
7. Rafiee S., Marefat M.S. Experimental and Numerical Evaluation of New Seismic Details for Connection of Post-tensioned Flat Slabs to Edge Steel Columns // Current Trends in Civil & Structural Engineering. 2020. Vol. 6, No. 4. Pp. 5–17.
8. Kim C.-V., Lee C.-H., Kang T.H.-K. Reinforcement of Connections between Concrete Beam and Tube-Filled Concrete Column for Enhanced Shear Strength // ACI Structural Journal. 2018. No. 111-S52.
9. Sousa R., Batalha N., Rodrigues H. Numerical simulation of beam-to-column connections in precast reinforced concrete buildings using fibre-based frame models // Engineering Structures. 2020. Vol. 203. Article 109845.
10. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 [Электронный ресурс]. Введ. 2011-05-20. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 80 с. Режим доступа: <https://meganorm.ru/In-dex2/1/4293782/4293782487.htm> (дата обращения: 22.05.2024)
11. Youssef M.A., Elfeki M.A. Seismic performance of concrete frames reinforced with superelastic shape memory alloys // Smart Structures and Systems. 2012. Vol. 9, No. 4. Pp. 313–333.
12. Loqman N., Safiee N.A., Bakar N.A., Nasir N.A.M. Structural Behavior of Steel-Concrete Composite Beam using Bolted Shear Connectors: A Review // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 203. Article 601023:45.
13. Salman W.D. Finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP in flexural // Diyala Journal of Engineering Sciences. 2009. Vol. 02(02)/ Pp. 88–104. DOI:10.24237/djes.2009.02207.
14. Idelsohn S.R. Analysis of Reinforced Concrete Structures Using Ansys Nonlinear Concrete Model // Computational Mechanics. 1998. Vol. 1(8). Pp. 125–132.
15. MacGregor J.G. Mechanics and Design. 4th ed. NJ: Pearson. 2005. 909 p.
16. Wight J.K., MacGregor J.G. Железобетон: механика и проектирование. Москва: Издательский центр «Академия», 2012.
17. Справка Autodesk Robot Structural Analysis 2022 [Электронный ресурс]. URL: <https://help.autodesk.com/view/RSA-PRO/2022/RUS/?guid=GUID-E60964F0-7BA5-4E48-8339-9B46D03F6242> (дата обращения: 12.09.23).
18. Справка Autodesk Robot Structural Analysis 2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.autodesk.com/RSAPRO/2014/RUS/index.html?url=filesROBOT/GUID-539BF9B3-3DA5-4E07-8BC6-15284F87843A.htm,topicNumber=ROBOTd30e61205> (дата обращения: 12.09.23).
19. Nilson A.H., Darwin, D., Dolan C.W. Проектирование бетонных конструкций. Москва: Издательство «Стройиздат», 2015.

20. American Concrete Institute. Требования к железобетонным конструкциям (ACI 318) и комментарии (ACI 318R). Москва: Издательство «Стройиздат», 2020.

21. Дилгер У.Х. Практическое армирование на срез для монолитных плоских плит перекрытий // PCA Research and Development Bulletin. 1966. № 66. С. 20–26.

Информация об авторах

Тимофеев Павел Сергеевич, аспирант кафедры здания, строительные конструкции и материалы. E-mail: pao.t@yandex.ru. Сибирский государственный университет путей сообщения. Россия, 630049, Новосибирск, Россия, ул. Д. Ковальчук, 191.

Поступила 11.04.2024 г.

© Тимофеев. П.С., 2024

22. Лейман И.А., Горшков Г.В. Проектирование монолитных железобетонных конструкций: учебное пособие. М.: Стройиздат, 2001. 420 с.

23. ACI Committee 421. Shear Reinforcement for Slabs: Report of ACI Committee 421. Farmington Hills, MI: ACI, 2008. 58 p.

Timofeev P.S.

Siberian Transport University

Email: pao.t@yandex.ru

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE MONOLITHIC BEAMLESS SLAB CONNECTION WITH A STEEL CONCRETE COLUMN USING SHEAR BEAM CONNECTION, CONSIDERING THE JOINT WORK OF CONCRETE AND STEEL

Abstract. The presented study conducts a comprehensive analysis of the performance of a monolithic slab-column connection utilizing a shear key. Utilizing the finite element method in the ANSYS software suite, a detailed geometric model of the structure is developed, facilitating complex numerical simulations. Special attention is paid to the interaction between concrete and steel within the structure, as well as the transfer of forces through the shear key. The obtained results include a detailed assessment of stress and deformation distribution in various components of the structure, enhancing the overall understanding of its mechanical behavior. The aim of the study is not only to analyze the effectiveness of employing a shear key to ensure the strength and stability of the slab-column connection, but also to generate practical recommendations for optimizing the design to improve the interaction between materials and enhance the reliability of construction projects. The presented research is significant for engineers and designers seeking to improve the processes of design and construction in the modern industry, as well as for developers of regulatory documents in the field of construction and infrastructure. The findings of the study can be applied in the development of new construction technologies.

Key words: monolithic flat slab, composite column, shear connection, numerical analysis, finite element method (FEM), stresses and deformations

REFERENCES

1. Berezovskiy B.I., Evdokimov N.I., Zhadonovskiy B.V., Rozenboym L.S., Shirokova L.A. Construction of monolithic structures of buildings and structures [Vozvedenie monolitnykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 335 p. (rus)

2. Vedyakov I.I., Konin D.V., Krylov S.B., Semenov V.A., Krylov A.S., Rozhkova L.S. Manual for the design of steel-reinforced concrete structures [Rukovodstvo po proektirovaniyu stalezhelezobetonnykh konstruksiy]. STO ARSS 11251254.001-018-4. Moscow: AKSIOMGRAFIKS UNION, 2018. 114 p. (rus)

3. American Concrete Institute. Guide to the Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures. American Concrete Institute, 2020. 224 p.

4. Brendel G. Stahlbetonbau unter Berücksichtigung des Spannbetons. Construction with preservation of residual steel concrete. Basic principles of theory and practice [Stroitelstvo s ispolzovaniem predvaritelno napryazhennogo stalezhelezobetona. Osnovnye polozheniya teorii i praktiki]. Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1958. 350 p. (rus)

5. Johnson R.P. Designer's Guide to Eurocode 4: Design of Steel and Composite Structures EN 1994-1-1 [Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 4: proektirovanie stalezhelezobetonnykh konstruksiy EN 1994-1-1]. Moscow: MISI-MGSU, 2012. 413 p. (rus)

6. Bompa D.V., Elghazouli A.Y. Structural performance of RC flat slabs connected to steel columns with shear heads. Journal of Structural Engineering. 2016. Vol. 117, No. 15. Pp. 161–183.

7. Rafiee S., Marefat M.S. Experimental and Numerical Evaluation of New Seismic Details for Connection of Post-tensioned Flat Slabs to Edge Steel Columns. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*. 2020. Vol. 6, No. 4. Pp. 5–17.
8. Kim C.-V., Lee C.-H., Kang T.H.-K. Reinforcement of Connections between Concrete Beam and Tube-Filled Concrete Column for Enhanced Shear Strength. *ACI Structural Journal*. 2018. No. 111–S52.
9. Sousa R., Batalha N., Rodrigues H. Numerical simulation of beam-to-column connections in precast reinforced concrete buildings using fibre-based frame models. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 203. Article 109845.
10. SP 20.13330.2011. Loads and Impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85 [Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85]. Introduced 2011-05-20. Moscow: OAO «TsPP», 2011. 80 p. Available at: <https://megamnorm.ru/Index2/1/4293782/4293782487.htm> (accessed: 22.05.2024).
11. Youssef M.A., Elfeki M.A. Seismic performance of concrete frames reinforced with superelastic shape memory alloys. *Smart Structures and Systems*. April 2012. Vol. 9, No. 4. Pp. 313–333.
12. Loqman N., Safiee N.A., Bakar N.A., Nasir N.A.M. Structural Behavior of Steel-Concrete Composite Beam using Bolted Shear Connectors: A Review. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 203. Article 601023:45.
13. Salman W.D. Finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP in flexural. *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2009. Vol. 02(02). Pp. 88–104. DOI:10.24237/djes.2009.02207
14. Idelsohn S.R. Analysis of Reinforced Concrete Structures Using Ansys Nonlinear Concrete Model. *Computational Mechanics*. 1998. Vol. 1(8). Pp. 125–132.
15. MacGregor J.G. *Mechanics and Design*. 4th ed. NJ: Pearson. 2005. 909 p.
16. Wight J.K., MacGregor J.G. *Reinforced Concrete: Mechanics and Design [Zhelezobeton: mekhanika i proektirovanie]*. Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2012.
17. Autodesk Robot Structural Analysis 2022 Reference [Elektronnyy resurs]. URL: <https://help.autodesk.com/view/RSA-PRO/2022/RUS/?guid=GUID-E60964F0-7BA5-4E48-8339-9B46D03F6242> (accessed: 12.09.23).
18. Autodesk Robot Structural Analysis 2014 Reference [Elektronnyy resurs]. URL: <http://docs.autodesk.com/RSAPRO/2014/RUS/index.html?url=filesROBOT/GUID-539BF9B3-3DA5-4E07-8BC6-15284F87843A.htm,topicNumber=ROBOTd30e61205> (accessed: 12.09.23).
19. Nilson A.H., Darwin D., Dolan C.W. *Design of Concrete Structures [Proektirovanie betonnykh konstruksiy]*. Moscow: Izdatelstvo «Stroyizdat», 2015.
20. American Concrete Institute. *Requirements for Reinforced Concrete Structures [Trebovaniya k zhelezobetonnykh konstruksiyam]*. Moscow: Stroyizdat, 2019.
21. Dilger U.H. *Practical Shear Reinforcement for Monolithic Flat Slabs [Prakticheskoe armirovanie na srez dlya monolitnykh ploskikh plit perekrytiy]*. PCA Research and Development Bulletin. 1966. No. 66. Pp. 20–26.
22. Leyman I.A., Gorshkov G.V. *Design of Monolithic Reinforced Concrete Structures: A Textbook [Proektirovanie monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy: uchebnoe posobie]*. Moscow: Stroyizdat, 2001. 420 p.
23. ACI Committee 421. *Shear Reinforcement for Slabs: Report of ACI Committee 421*. Farmington Hills, MI: ACI, 2008. 58 p.

Information about the authors

Timofeev, Pavel S. Graduate Student of the Department of Building, Construction Structures and Materials. E-mail: pao.t@yandex.ru. Siberian Transport University. Russia, 630049, Novosibirsk, 191 Dusi Kovalchuk Street.

Received 11.04.2024

Для цитирования:

Тимофеев П.С. Численное исследование работы узла монолитного безбалочного перекрытия со стале-бетонной колонной, с применением срезного балочного узла, с учетом совместной работы бетона и стали // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 49–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-49-59

For citation:

Timofeev P.S. Numerical investigation of the monolithic beamless slab connection with a steel concrete column using shear beam connection, considering the joint work of concrete and steel. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 9. Pp. 49–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-49-59

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-60-71

*Чесноков А.В., Михайлов В.В.

Липецкий государственный технический университет

*E-mail: andreychess742@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ ШПРЕНГЕЛЬНОГО ТИПА

Аннотация. Комбинированные строительные конструкции обладают преимуществами с точки зрения эффективности использования высокопрочных материалов и снижения деформативности под нагрузкой. Для расширения области их практического применения требуется совершенствование методик расчета и проектирования. Объектом исследования в настоящей работе является комбинированная конструкция шпренгельного типа, верхний пояс которой образован прямолинейными балками, расположенными радиально и соединенными шарнирно в коньковом узле, а нижний пояс состоит из высокопрочных вантовых элементов и шарнирных стержней. Для статического анализа исследуемой конструкции принята её плоская модель. Раскрытие статической неопределённости выполнено при помощи метода сил, применимость которого обоснована ограничением деформативности конструкции требованиями второй группы предельных состояний. Предложены аналитические выражения для определения усилий и изгибающих моментов в основных элементах конструкции. Полученные выражения, за счет введения дополнительных параметров, унифицированы для выполнения расчета на предварительное напряжение и внешние нагрузки. Предложена усовершенствованная методика определения матрицы коэффициентов и вектора свободных членов канонической системы метода сил, позволяющая автоматизировать расчет. Разработана методика учета гибких вантовых элементов, способных воспринимать только растягивающие усилия. Методика заключается в последовательном выключении сжатых вант из расчетной схемы. Результаты работы вносят вклад в развитие комбинированных конструкций шпренгельного типа и могут быть использованы при поиске оптимальных проектных решений, а также, для выявления закономерностей напряженно-деформированного состояния комбинированных конструкций посредством численного моделирования.

Ключевые слова: комбинированная строительная конструкция, шпренгельная система, метод сил, гибкая ванта, предварительное напряжение.

Введение. Комбинированные строительные конструкции представляют собой системы разнородных материалов и элементов, обладающих различными областями эффективного использования [1]. Объединение гибких вант с балками жесткости является действенной мерой снижения деформативности большепролетных конструкций и повышения эффективности применения высокопрочных сталей [2]. Вместе с тем, действие ветровой нагрузки на комбинированные системы с балками жесткости, подвешенными к несущим вантовым элементам, приводит к выключению гибких подвесок из работы [3].

Для смягчения негативного влияния знакопеременных нагрузок получили распространение шпренгельные системы, состоящие из жесткого элемента и вантовых предварительно напряженных поясов [4, 5]. В работе [6] предлагается конструкция покрытия повышенной жесткости, верхний пояс которой состоит из горизонтально расположенных полос листовой стали, поддерживаемых предварительно напряженной сетью нижнего пояса. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность применения комбинированных конструкций повышенной жесткости, приведены в работах [7, 8].

Важным шагом на пути развития шпренгельных систем стало появление конструкций, в которых натяжение вантового пояса создает в жестком элементе изгибающие моменты обратного знака, по сравнению с моментами, реализующимися от действия преобладающих внешних нагрузок [9]. Плоские арочные системы, предварительно напряженные затяжками, находят применение как в зданиях капитального назначения, так и во временных сооружениях [10].

Дальнейшим развитием шпренгельных конструкций можно считать пространственные купольные системы. Эффективность применения шпренгельных куполов подтверждена проведением численного моделирования и натурными испытаниями [11, 12, 13].

Одним из наиболее распространенных приемов статического анализа комбинированных конструкций является применение итерационных методик, позволяющих найти решение за конечное число шагов [14]. Параметрический итерационный анализ работы под нагрузкой подвесных мостов предложен в работе [15]. Смешанный алгоритм для нелинейного анализа комбинированных конструкций, состоящих из гибких вант

и жестких на изгиб элементов, предложен в работе [16]. Достижение равновесного состояния обеспечивается применением итерационного метода секущих.

Энергетический метод применен в работе [17] для нелинейного расчета комбинированного купола. Поиск минимума потенциальной энергии на стадии предварительного напряжения и при действии внешней нагрузки осуществляется итерационным методом решения системы нелинейных уравнений равновесия.

Несмотря на преимущества численных методов, их применение требует предварительного задания основных параметров конструкции. Аналитические подходы к статическому расчету, таким образом, сохраняют свою актуальность, позволяя оценить требуемые жесткостные характеристики элементов, а также, служа инструментом оценки правильности принятых расчетных схем и полученных результатов [18].

Инженерная методика расчета радиально-балочного купола разработана и подтверждена экспериментально в работах [19, 20]. Методика включает определение изгибающих моментов в наиболее опасном сечении ребер верхнего пояса, а также, учитывает влияние стальной мембраны покрытия на работу конструкции.

Методика определения требуемого натяжения гибких элементов купольной конструкции на стадии создания предварительного напряжения предложена в работе [21]. Данная методика может быть применена на этапе разработки проектного решения конструкции при определении ее основных параметров.

При действии внешней нагрузки, гибкие элементы комбинированных конструкций, подверженные «условному сжатию», выключаются из работы, а комбинированная система проявляет конструктивно нелинейное поведение [22].

Для решения проблемы поиска т.н. «рабочей схемы», получаемой из расчетной схемы конструкции путем удаления выключившихся элементов, в работах [23–26] предложено применение метода конечных элементов в форме смешанного метода и метода сил, без учета геометрической нелинейности. Совершенствование метода сил в части оптимизации расчетного алгоритма решения канонической системы большой размерности предложено в [27, 28]. Применение линейных методов, к числу которых относятся метод сил, метод перемещений и смешанный метод, для расчета комбинированных систем шпренгельного типа обосновано ограничением деформаций конструкции требованиями второй группы предельных состояний.

Из приведенного литературного обзора следует вывод о перспективности комбинированных строительных конструкций шпренгельного типа, обладающих преимуществами с точки зрения эффективности использования высокопрочных материалов и снижения деформативности под нагрузкой. Вместе с тем, для расширения области практического применения комбинированных систем требуется совершенствование методик статического расчета, используемых при разработке проектных решений и определении оптимальных параметров конструкции.

Целью работы является разработка усовершенствованной методики статического расчета комбинированной конструкции шпренгельного типа, предназначенной для применения на этапе вариантного проектирования при назначении основных параметров конструкции.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- предложены аналитические выражения для определения усилий и изгибающих моментов в элементах исследуемой конструкции;
- предложено введение параметров, позволяющих автоматизировать процесс расчета;
- предложены выражения для расчета матрицы коэффициентов и вектора свободных членов канонической системы метода сил;
- разработан алгоритм последовательного выключения гибких вантовых элементов из расчетной схемы при их сжатии;
- выполнено сопоставление результатов, полученных применением предложенной методики, с результатами специализированного программного комплекса.

Методика проведения исследований. Верхний пояс исследуемой конструкции образован прямолинейными балками, расположенными радиально и соединенными шарнирно в коньковом узле (рис. 1, а). Балки верхнего пояса объединены при помощи распорок с нижним поясом, состоящим из высокопрочных тросовых и вантовых элементов, с образованием ребер несущего каркаса. Кольцевой вантовый элемент и кольцо из шарнирных стержней объединяют радиальные ребра несущего каркаса между собой.

Для статического анализа исследуемой конструкции принята плоская модель с шарнирно подвижной правой опорой (рис. 1, б). В соответствии с работой [29], кольцевой вантовый элемент нижнего яруса и кольцо из шарнирных стержней верхнего яруса пространственной системы заменены на эквивалентные по деформативности затяжку и распорку.

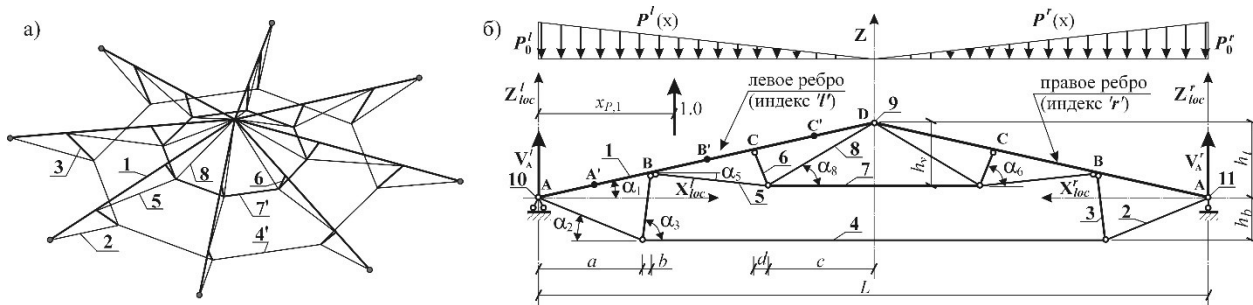


Рис. 1. Несущий каркас комбинированной конструкции: а) общий вид; б) плоская модель; 1 – балка верхнего пояса (изгибно-жесткий элемент); 2 – диагональный несущий трос (гибкая нить); 3 – стойка нижнего яруса (шарнирный стержень); 4' – кольцевой вантовый элемент нижнего яруса; 4 – затяжка плоской модели (гибкая нить); 5 – оттяжка верхнего яруса (гибкая нить); 6 – стойка верхнего яруса (шарнирный стержень); 7' – кольцо из шарнирных стержней верхнего яруса; 7 – распорка плоской модели (шарнирный стержень); 8 – соединительный элемент верхнего яруса (шарнирный стержень); 9 – коньковый шарнир; 10, 11 – шарнирно неподвижная и подвижная опоры, соответственно

Исследуемая конструкция является статически неопределимой системой. Для раскрытия статической неопределимости применен метод сил. За лишние неизвестные $X_1 \dots X_3$ принято усилие в затяжке 4, N_4 , а также, усилия в оттяжках верхнего яруса 5, N_5^l и N_5^r :

$$N_4 = X_1, N_5^l = X_2 \text{ и } N_5^r = X_3, \quad (1)$$

где индексы 'l' и 'r' относятся к левому и правому ребру, соответственно.

Элементы конструкции, а также, ребра в локальных системах координат, $X_{loc}^l Z_{loc}^l$ и $X_{loc}^r Z_{loc}^r$, показаны на рис. 1, б. Введем дополнительные параметры X_4 и Ψ . Параметр Ψ определяет тип внешней нагрузки: $\Psi = 1$, при расчете на внешнюю (полезную) нагрузку и $\Psi = 0$ при расчете на единичную нагрузку (для определения прогиба). Параметр X_4 принимается равным единице, $X_4 = 1$, при учете внешней нагрузки, и нулю, $X_4 = 0$, при отсутствии внешней нагрузки (для расчета на предварительное напряжение).

Лишние неизвестные и параметр X_4 объединим в расширенный вектор:

$$\vec{\Omega} = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T. \quad (2)$$

Схема действия нагрузок приведена на рис. 1, б. С учетом радиального расположения ребер, нагрузки имеют треугольное распределение. Учитываются только вертикальные нагрузки. Полезные нагрузки, $P^l(x)$ и $P^r(x)$, приведены в локальных системах координат ребер.

Предполагается, что полезная нагрузка на правое ребро не превышает нагрузку на левое: $P_0^r \leq P_0^l$, таким образом, максимальный прогиб купола реализуется на левом ребре. Единичная нагрузка для определения прогиба привязана в

глобальной системе координат, связанной с левой опорой: $x_{P,1} \leq L/2$. Направление единичной нагрузки совпадает с глобальной осью Z .

Учитывая требования второй группы предельных состояний, а также применимость метода сил только для линейных систем, запишем ограничение на величину перемещений:

$$\max(|\Delta Z_{ld}|, |\Delta Z_{pr}|) \leq L \cdot \min(1/200, k_{\Delta, II}), \quad (3)$$

где $k_{\Delta, II}$ – относительный предельный прогиб, принятый по требованиям нормальной эксплуатации конструкции; ΔZ_{pr} – вертикальное перемещение, вызванное предварительным напряжением, относительно исходного (ненапряженного) состояния конструкции; ΔZ_{ld} – вертикальное перемещение, вызванное внешней нагрузкой, относительно преднапряженного состояния.

Вертикальные перемещения узлов верхнего пояса определяются методом Мора. Единичная вертикальная сила прикладывается в точке, где производится определение перемещения, с последующим численным интегрированием произведения эпюр от данной силы на эпюры от внешней нагрузки. Термин «эпюра» в настоящей работе означает функциональную зависимость внутреннего силового фактора (продольная сила и изгибающий момент) от координаты расчетного сечения. Численное интегрирование осуществляется методом трапеций при помощи программного комплекса MathCad.

Верификация предложенной расчетной методики выполнена путем сравнения с результатами расчета в специализированном программном комплексе MAV.Structure [30]. Данный программный комплекс позволяет выполнить статический расчет ните-стержневых систем с учетом геометрической нелинейности. Имеющиеся

типы конечных элементов позволяют моделировать работу односторонних связей (гибких нитей), способных воспринимать только растягивающие воздействия.

Основная часть. Из предположения о вертикальном действии внешних нагрузок следует

$$V_A^l = \frac{X_4 \cdot \Psi}{L} \cdot \left[\int_0^{0.5L} P^l(x) \cdot (L-x) dx + \int_0^{0.5L} P^r(x) \cdot x dx \right] - X_4 \cdot (1-\Psi) \cdot \left(1 - \frac{x_{P,1}}{L} \right), \quad (4,a)$$

$$V_A^r = X_4 \cdot \Psi \cdot \left[\int_0^{0.5L} P^l(x) dx + \int_0^{0.5L} P^r(x) dx \right] - X_4 \cdot (1-\Psi) - V_A^l. \quad (4,b)$$

Запишем выражения для продольных сил в вантовых элементах и распорках:

– усилия в элементах нижнего яруса (маркировка элементов конструкции и обозначение углов α приведены на рис. 1):

$$N_2^{l/r} = N_4 \cdot \sin(\alpha_3) / \sin(\alpha_2 + \alpha_3), \quad (5)$$

$$N_3^{l/r} = -N_4 \cdot \sin(\alpha_2) / \sin(\alpha_2 + \alpha_3), \quad (6)$$

где индекс 'l/r' означает, что усилие действует в элементе, принадлежащем левому 'l', либо правому 'r' ребру конструкции;

– усилие в распорке верхнего яруса, моделирующей кольцо из шарнирных стержней:

$$N_7 = \frac{1}{h_v} \cdot \left[V_A^l \cdot \frac{L}{2} - N_4 \cdot (h_t + h_b) - X_4 \cdot \Delta N_{7,p} \right], \quad (7,a)$$

где

$$\Delta N_{7,p} = \Psi \cdot \int_0^{0.5L} P^l(x) \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right) dx - (1-\Psi) \cdot \left(\frac{L}{2} - x_{P,1} \right); \quad (7,b)$$

– усилия в стержневых элементах верхнего яруса:

$$N_6^{l/r} = \frac{N_7 \cdot \sin(\alpha_8) - N_5^{l/r} \cdot \sin(\alpha_5 + \alpha_8)}{\sin(\alpha_6 + \alpha_8)}, \quad (8)$$

$$N_8^{l/r} = \frac{N_6^{l/r} \cdot \cos(\alpha_6) + N_5^{l/r} \cdot \cos(\alpha_5) - N_7}{\cos(\alpha_8)}. \quad (9)$$

Ребро верхнего пояса представим в виде ряда прямолинейных балочных элементов, жестко соединенных между собой. Выразим усилия и изгибающий момент в сечении с абсциссой x , при $x \in [x_{n,i} \dots x_{k,i}]$, где $x_{n,i}$ и $x_{k,i}$ – абсциссы начального и конечного сечений балочного элемента i в локальной системе координат ребра (индексы 'l' и 'r' условно не показаны):

$$N_i(x) = N_{i,n} + X_4 \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \Delta F_p, \quad (10,a)$$

$$Q_i(x) = Q_{i,n} - X_4 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \Delta F_p, \quad (10,b)$$

равенство нулю горизонтальной реакции опоры: $H_A = 0$. Запишем выражения для вертикальных опорных реакций $V_A^{l/r}$:

$$M_i(x) = M_{i,n} + Q_{i,n} \cdot \frac{x - x_{n,i}}{\cos(\alpha_1)} - X_4 \cdot \Delta M_p, \quad (10,b)$$

где

$$\Delta F_p = \Psi \cdot \int_{x_{n,i}}^x P(\xi) d\xi + \eta \cdot (1-\Psi), \quad (11,a)$$

$$\Delta M_p = \Psi \cdot \int_{x_{n,i}}^x P(\xi) \cdot (x - \xi) d\xi + \eta \cdot (1-\Psi) \cdot (x - x_{P,1}), \quad (11,b)$$

где $N_{i,n}$, $Q_{i,n}$, $M_{i,n}$ – усилия и изгибающие моменты в начальном сечении рассматриваемого элемента; η – коэффициент: $\eta = -1.0$ при $x_{P,1} \in [x_{n,i} \dots x]$ для левого ребра (с индексом 'l'), $\eta = 0$ при $x_{P,1} \notin [x_{n,i} \dots x]$ для левого ребра и независимо от $x_{P,1}$ для правого ребра (с индексом 'r').

Абсциссы начального и конечного сечений для участков AB , BC и CD верхнего пояса составляют: $x_{n,AB} = 0$, $x_{k,AB} = x_{n,BC} = a + b$, $x_{k,BC} = x_{n,CD} = 0.5 \cdot L - c - d$ и $x_{k,CD} = 0.5 \cdot L$. Усилия в начальных сечениях элементов верхнего пояса:

$$N_{AB,n}^{l/r} = -N_2^{l/r} \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2) - V_A^{l/r} \cdot \sin(\alpha_1), \quad (12)$$

$$Q_{AB,n}^{l/r} = -N_2^{l/r} \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + V_A^{l/r} \cdot \cos(\alpha_1), \quad (13)$$

$$N_{BC,n}^{l/r} = N_{AB,k}^{l/r} + N_3^{l/r} \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_3) - N_5^{l/r} \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_5), \quad (14)$$

$$Q_{BC,n}^{l/r} = Q_{AB,k}^{l/r} + N_3^{l/r} \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha_3) - N_5^{l/r} \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_5), \quad (15)$$

$$N_{CD,n}^{l/r} = N_{BC,k}^{l/r} - N_6^{l/r} \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_6), \quad (16)$$

$$Q_{CD,n}^{l/r} = Q_{BC,k}^{l/r} - N_6^{l/r} \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_6). \quad (17)$$

где индекс 'k' означает усилие в конечном сечении, найденное по (10) при $x = x_{k,i}$.

Учитывая, что на конструкцию не действуют внешние сосредоточенные моменты, запишем соотношения для изгибающих моментов

в начальных и конечных сечениях верхнего пояса: $M_{AB,n}^{l/r} = 0$, $M_{BC,n}^{l/r} = M_{AB,k}^{l/r}$ и $M_{CD,n}^{l/r} = M_{BC,k}^{l/r}$. Приведенные выражения позволяют определить усилия и изгибающие моменты в элементах конструкции при заданном векторе Ω (2) и параметре Ψ .

Неизвестные усилия X_1 , X_2 и X_3 определяются из решения системы канонических уравнений метода сил:

$$\vec{X} = -[\delta]^{-1} \cdot \vec{\Delta}, \quad (18)$$

где $\vec{X} = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T$ - вектор искомых усилий в лишних связях; $[\delta]$ - квадратная матрица коэффициентов $\delta_{s,j}$, $s \in [1...n]$, $j \in [1...n]$; $n=3$ - число лишних неизвестных; $\vec{\Delta}$ - вектор свободных членов:

$$\vec{\Delta} = \vec{\Delta}_p + \Psi \cdot \vec{\Delta}_t, \quad (19)$$

где $\vec{\Delta}_p = [\Delta_{1,p} \ \Delta_{2,p} \ \Delta_{3,p}]^T$ и $\vec{\Delta}_t = [\Delta_{1,t} \ \Delta_{2,t} \ \Delta_{3,t}]^T$ - вектор перемещений в основной системе от заданной нагрузки и вектор заданных натяжений элементов для обеспечения преднапряжения конструкции.

Заданное натяжение элемента, $\Delta_{s,t}$ (при растяжении $\Delta_{s,t} < 0$, $s \in [1...n]$), равно разности начальной длины элемента (т.н. длина заготовки), $L_{s,0}$, и геометрической длины элемента (расстояние между начальным и конечным сечениями), $L_{s,g}$:

$$\Delta_{s,t} = L_{s,0} - L_{s,g}. \quad (20)$$

Объединим матрицу $[\delta]$ и вектор $\vec{\Delta}_p$ в расширенную матрицу $[\Phi]$:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} [\delta] & \vec{\Delta}_p \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Элемент $\Phi_{s,k}$ матрицы $[\Phi]$ (при $s \in [1...n]$, $k \in [1...(n+1)]$) определяется интегрированием произведения эпюр внутренних силовых факторов в элементах конструкции:

$$\Phi_{s,k} = \varphi^l + \varphi^r + \varphi_{N_4} + \varphi_{N_7}, \quad (22)$$

где φ_{N_4} и φ_{N_7} - коэффициенты для элементов, объединяющих ребра конструкции; φ^l и φ^r - коэффициенты для левого и правого ребра:

$$\varphi^{l/r} = \varphi_N^{l/r} + \varphi_M^{l/r}, \quad (23)$$

где (индексы 'l' и 'r' условно не показаны):

$$\varphi_N = \varphi_{N_{AB}} + \varphi_{N_{BC}} + \varphi_{N_{CD}} + \varphi_{N_2} + \varphi_{N_3} + \varphi_{N_5} + \varphi_{N_6} + \varphi_{N_8}, \quad (24)$$

$$\varphi_M = \varphi_{M_{AB}} + \varphi_{M_{BC}} + \varphi_{M_{CD}}, \quad (25)$$

где φ_{N_q} - коэффициент для стержневого элемента q :

$$\varphi_{N_q} = \frac{L_q}{EA_q} \cdot N_{q,[s]} \cdot N_{q,[k]}, \quad (26)$$

где L_q , EA_q - длина и продольная жесткость элемента.

Коэффициенты для изгибно-жесткого верхнего пояса, состоящего из ряда участков i , $i = \{AB, BC, CD\}$, определяются численным интегрированием при помощи метода трапеций:

$$\varphi_{N_i} = \frac{1}{EA_1 \cdot \cos(\alpha_1)} \cdot \left[\int_{x_{n,i}}^{x_{k,i}} N_{i,[s]}(x) \cdot N_{i,[k]}(x) dx \right], \quad (27)$$

$$\varphi_{M_i} = \frac{1}{EI \cdot \cos(\alpha_1)} \cdot \left[\int_{x_{n,i}}^{x_{k,i}} M_{i,[s]}(x) \cdot M_{i,[k]}(x) dx \right], \quad (28)$$

где EA_1 и EI - продольная жесткость и жесткость на изгиб элемента верхнего пояса.

Продольные усилия и изгибающие моменты, используемые для расчета коэффициентов φ по (26-28), находятся из выражений (1), (5-10). При этом, нижний индекс в квадратных скобках, например $[k]$, означает, что для вычисления данного силового фактора применяется расширенный вектор Ω (2), равный столбцу k единичной матрицы размером $(n+1) \times (n+1)$. Таким образом, при $k \leq n$, продольные силы и изгибающие моменты в элементах конструкции определяются от действия единичных усилий в лишних связях $X_k = 1$, а при $k = n+1$ - от действия внешней нагрузки на основную систему метода сил.

Решение (18) содержит усилия в вантовом элементе нижнего яруса 4 и оттяжках верхнего яруса 5. Данные элементы способны работать только на растяжение, таким образом, все компоненты вектора X должны быть неотрицательны:

$$X_j \geq 0, \quad (29)$$

где $j \in [1...n]$ - индекс, $n=3$.

Предлагается итерационная методика поиска допустимого решения (рис. 2). Методика заключается в последовательном выключении из

расчетной схемы элементов, нарушающих условие (29): $X_j < 0$. На каждой итерации производится выключение т.н. «наиболее сжатого» элемента j , имеющего $X_j = \min(\vec{X})$. При этом, элементы, выключенные на предыдущих итерациях, имеющие $X_j = 0$, выключаются автоматически.

Методика применяется только при расчете на внешнюю нагрузку, при $\Psi = 1$. При расчете на единичную нагрузку ($\Psi = 0$, для определения деформаций) все элементы конструкции условно считаются способными воспринимать усилия обоих знаков.

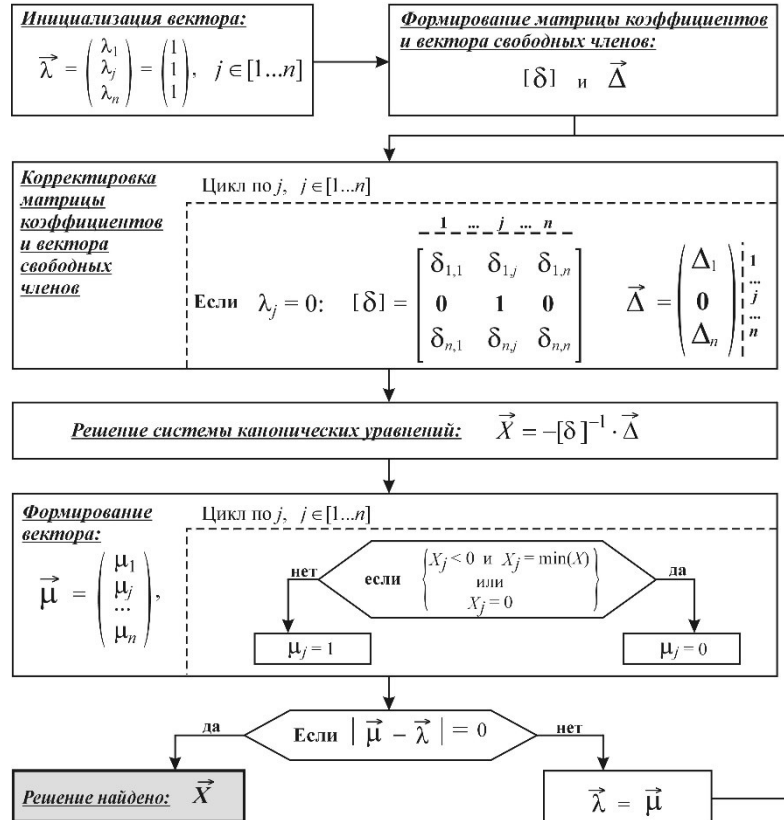


Рис. 2. Алгоритм поиска допустимого решения системы канонических уравнений (18)

Перемещение, вызванное внешней нагрузкой, относительно преднапряженного состояния:

$$\Delta Z_{ld} = \Phi_{s,k}, \quad (30)$$

где $\Phi_{s,k}$ - результат интегрирования произведения эпюр (22), где индекс 's' соответствует единичной нагрузке, а индекс 'k' соответствует заданной нагрузке на конструкцию.

Изгибающие моменты и усилия в элементах, необходимые для вычисления $\Phi_{s,k}$, определяются по (1), (5-10) при $X_4 = 1$ и найденных усилиях $X_{j,[s]}$ и $X_{j,[k]}$, где $j \in [1...n]$ - номер лишней связи метода сил. В расчете на единичную нагрузку (индекс 's' в квадратных скобках) применяется параметр $\Psi = 0$, а усилия $X_{j,[s]}$ определяются решением системы линейных уравнений (18) за один шаг. При расчете на внешнюю нагрузку (индекс 'k' в квадратных скобках), при-

меняется параметр $\Psi = 1$, а для определения усилий $X_{j,[k]}$ применяется итерационная методика (рис. 2).

Вертикальное перемещение от предварительного напряжения конструкции найдем по [31]:

$$\Delta Z_{pr} = \Delta_{1,t} \cdot N_{4,[s]} + \Delta_{2,t} \cdot N_{5,[s]}^l + \Delta_{3,t} \cdot N_{5,[s]}^r, \quad (31)$$

где $\Delta_{1,t}$ - натяжение вантового элемента нижнего яруса 4; $\Delta_{2,t}$ и $\Delta_{3,t}$ - натяжения оттяжек верхнего яруса 5, расположенных на левом и правом ребре, соответственно.

В качестве примера рассмотрена плоская модель комбинированной конструкции, имеющая пролет $L = 24.0$ м, высоту в коньке $h_t = 4.5$ м, высоту нижнего яруса $h_b = 2.0$ м, горизонтальные размеры $a = 3.5$ м, $b = -0.28$ м, $c = 3.0$ м, и $d = 0.29$ м. Углы наклона элементов к горизонту

составляют: $\alpha_1 = 20.5^0$, $\alpha_2 = 30^0$, $\alpha_3 = 95^0$, $\alpha_5 = 2.8^0$, $\alpha_6 = 83^0$ и $\alpha_8 = 50^0$.

Вантовые элементы исследуемой конструкции приняты из высокопрочных стальных тросов с расчетным сопротивлением при растяжении $R_c = 70$ кН/см² и модулем деформации $E_c = 1.3 \cdot 10^4$ кН/см². Диагональный несущий трос и затяжка плоской модели (элементы 2 и 4, обозначенные на рис. 1) приняты диаметром 16.6 мм, с площадью поперечного сечения $A_2 = A_4 = 1.61$ см². Оттяжки верхнего яруса (элементы 5) приняты диаметром 8.1 мм, с площадью поперечного сечения $A_5 = 0.38$ см².

Стойки, а также, шарнирные стержни верхнего яруса (элементы 3, 6 и 7) приняты из стальной трубы 102×4. Соединительный элемент верхнего яруса (элемент 8) принят из стальной трубы 70×4. Верхний пояс принят из прокатного двутавра I40. Материал верхнего пояса, а также, стоек, шарнирных стержней и соединительных элементов – сталь класса С245 с расчетным сопротивлением $R_y = 24$ кН/см² и модулем упругости $E = 2.06 \cdot 10^4$ кН/см².

Предварительное напряжение конструкции создается за счет натяжения затяжки 4, моделирующей кольцевой вантовый элемент. Предполагается, что оттяжки 5 изначально не напряжены. Величины заданных натяжений элементов

содержатся в векторе $\vec{\Delta}_t = [-0.15 \ 0.0 \ 0.0]^T$ м, в котором первый элемент соответствует затяжке 4, а оставшиеся элементы – оттяжкам 5, расположенным на левом и правом ребре конструкции, соответственно. Максимальное значение внешней нагрузки на опоре принято $P_0 = 18.0$ кН/м. Предполагается, что данная нагрузка включает снеговое воздействие и собственный вес элементов покрытия. Из условия нормальной эксплуатации конструкции, принят относительный предельный прогиб: $k_{\Delta, II} = 1/200$ (3).

Сравнение усилий и изгибающих моментов, полученных по предложенной расчетной методике, с результатами расчета в специализированном программном комплексе MAV.Structure, приведено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение усилий и изгибающих моментов

№ п.п.	Силовой фактор	Ед. изм.	Предложенная методика	Результаты MAV.Structure	Расхождение, %	№ п.п.	Силовой фактор	Ед. изм.	Предложенная методика	Результаты MAV.Structure	Расхождение, %
Верхний пояс						Верхний пояс					
1.	$N_{AA',A}$	кН	-105,45	-106,41	0,9	17.	M_C	кН×м	-37,32	-37,18	0,4
2.	$Q_{AA',A}$	кН	19,65	19,34	1,6	18.	$N_{CC',C}$	кН	-93,59	-93,97	0,4
3.	M_A	кН×м	0,00	0,00	0,0	19.	$Q_{CC',C}$	кН	15,68	15,40	1,8
4.	$N_{AA',A'}$	кН	-95,91	-96,81	0,9	20.	$N_{CC',C'}$	кН	-91,42	-92,02	0,7
5.	$Q_{AA',A'}$	кН	-5,91	-6,01	1,7	21.	$Q_{CC',C'}$	кН	-9,35	-9,84	5,1
6.	$M_{A'}$	кН×м	11,51	11,49	0,2	22.	$M_{C'}$	кН×м	-15,27	-15,63	2,3
7.	$N_{A'B,B}$	кН	-87,74	-88,58	1,0	23.	$N_{C'D,D}$	кН	-90,70	-91,05	0,4
8.	$Q_{A'B,B}$	кН	-27,35	-27,66	1,1	24.	$Q_{C'D,D}$	кН	8,01	7,87	1,8
9.	M_B	кН×м	-17,46	-17,52	0,4	Нижний пояс					
10.	$N_{BB',B}$	кН	-102,01	-102,41	0,4	25.	N_2	кН	105,67	106,32	0,6
11.	$Q_{BB',B}$	кН	23,30	22,91	1,7	26.	N_3	кН	-52,62	-52,43	0,4
12.	$N_{BB',B'}$	кН	-91,29	-91,85	0,6	27.	N_4	кН	87,24	87,61	0,4
13.	$Q_{BB',B'}$	кН	-3,25	-3,40	4,5	28.	N_5	кН	0,00	0,00	0,0
14.	$M_{B'}$	кН×м	6,51	6,17	5,4	29.	N_6	кН	-39,81	-39,83	0,1
15.	$N_{B'C,C}$	кН	-84,53	-84,83	0,4	30.	N_7	кН	-38,33	-38,31	0,1
16.	$Q_{B'C,C}$	кН	-23,09	-23,37	1,2	31.	N_8	кН	51,54	51,55	0,1
Примечания: 1. Для нижнего пояса обозначение продольной силы N включает номер элемента по рис. 1,б. 2. Для изгибающих моментов M в верхнем поясе указаны узлы по рис. 1,б. 3. Для продольных N и поперечных сил Q в верхнем поясе указаны узлы, а также, участки верхнего пояса, которым принадлежит элемент (рис. 1,б), например: $N_{AA',A'}$ – усилие на участке AA' в узле A'											

Вертикальные перемещения конькового узла D от предварительного напряжения конструкции, ΔZ_{pr} , найденные по (31) и при помощи

программного комплекса MAV.Structure, составляющие 88 мм и 94 мм, отличаются на 6,8 %. Расхождение вертикальных перемещений узла D от

внешней нагрузки относительно преднапряженного состояния, ΔZ_{ld} , составляющих -67 мм (30) и -71 мм (MAV.Structure), не превышает 6 %.

Из приведенного сравнения видно хорошее соответствие результатов предложенной методики статического анализа исследуемой конструкции и результатов, полученных при помощи специализированного программного комплекса MAV.Structure. Основная часть расхождений усилий и изгибающих моментов находится в диапазоне от 1 до 2 % (таблица 1). Наибольшее расхождение, составляющее 5,4 %, объясняется малыми абсолютными значениями сравниваемых величин (6.51 и 6.17 кН×м). Расхождения вертикальных перемещений конькового узла от предварительного напряжения и внешней нагрузки находятся в пределах 7 %.

Выводы

1. Разработана усовершенствованная методика статического расчета комбинированной конструкции шпренгельного типа, включающая аналитические выражения для определения усилий и изгибающих моментов в основных элементах. Предложенные выражения унифицированы для выполнения статического расчета на предварительное напряжение, а также, на действие внешней полезной и единичной нагрузки.

2. Предложена усовершенствованная методика определения матрицы коэффициентов и вектора свободных членов канонической системы метода сил, позволяющая автоматизировать расчет.

3. Разработана методика учета гибких элементов конструкции, способных воспринимать только растягивающие усилия. Методика заключается в последовательном выключении сжатых гибких элементов из расчетной схемы, что позволило применить метод сил для расчета исследуемой конструкции.

4. Результаты работы вносят вклад в развитие комбинированных конструкций шпренгельного типа. Предложенная методика расчета предназначена для реализации в математических программных комплексах общего назначения, позволяющих выполнять поиск оптимальных проектных решений, а также, выявлять закономерности напряженно-деформированного состояния комбинированных конструкций посредством численного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еремеев П.Г. Металлические комбинированные конструкции покрытий // Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 2 (21). С. 30–40.
2. Al-Rousan R. The impact of cable spacing on the behavior of cable-stayed bridges // Magazine

of Civil Engineering. 2019. № 91(7). Pp. 49–59. DOI: 10.18720/MCE.91.5

3. Mushchanov V., Protopopov I., Korsun O., Garifullin M. Definition of the rational geometry of the cable-beam cover over stadium tribunes // Procedia Engineering. 2015. № 117. Pp. 1001–1012. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.209

4. Егоров В.В. Комбинированные системы шпренгельного типа // VII международная научно-практическая интернет-конференция. Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Сборник научных трудов. 2020. С. 13–16.

5. Башаров Ф.Ф., Низамеев В.Г. Методика оптимизации конструктивных параметров плит покрытия из профнастила, подкрепленного шпренгельной системой // Перспективы науки. 2018. № 7 (106). С. 81–87.

6. Ding M., Shen Y., Wei Y., Luo B., Wang L., Zhang N. Preliminary design and experimental study of a steel-batten ribbed cable dome // Symmetry. 2021. Vol. 13, Iss. 11. Article 2136. DOI: 10.3390/sym13112136

7. Xue S., Wang Z., Li X., Liu R., Lu Z., Jing H., Fan Q., Liu T., Dezhkam M. Model test study on static performance of rib-patterned small rise-span ratio suspend-dome structure // Structures. 2022. Vol. 43. Pp. 1615–1628. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.070

8. Zhang A., Shangguan G., Zhang Y., Zou M., Wang J. Experimental study on static performance of fully assembled ridge-tube threading cable with annular-struts cable dome // Engineering Structures. 2023. Vol. 288. Article 116194. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116194

9. Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Долгушева В.В. Проблемы применения и проектирования арочных комбинированных систем // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 2. С. 25–35.

10. Xia Z., Jiang T., Yu T. Innovating arch structures with fiber-reinforced polymer composites: a review // Advances in Structural Engineering. 2023. Vol. 26, issue 13. Pp. 2341–2358. DOI: 10.1177/13694332231180373

11. Ундалов А.М., Ключев С.В., Сабитов Л.С., Ключев А.В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния радиально-балочных куполов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 12 (96). С. 521–530.

12. Sabitov L., Klyuev S., Undalov A., Mailyan L., Klyuev A., Fediuk R., Kashapov N., Akhtyamova L., Khezhev T., Zagidullin R. Comparison of the results of numerical and experimental studies of the

design of a radial-beam dome with triangular membrane core-shells // *Structures*. 2023. Vol. 48. Pp. 1118–1127. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.037

13. Ундалов А.М. Исследование напряженно-деформированного состояния радиально-балочного купола с мембранной кровлей // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 3 (33). С. 70–77.

14. Зиганшин А.Д., Ахтямова Л.Ш., Сабитов Л.С., Радайкин О.В., Киямов И.К. Численное моделирование конструкций сооружений башенного типа в программных комплексах ANSYS и Лира-Сапр // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2021. № 2. С. 65–67.

15. Arellano H., Gomez R., Tolentino D. Parametric analysis of multi-span cable-stayed bridges under alternate loads // *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2019. № 14(4). Pp. 543–567. DOI: 10.7250/bjrbe.2019-14.457

16. Coarita E., Flores L. Nonlinear analysis of structures cable – truss // *International Journal of Engineering and Technology*. 2015. № 7(3). Pp. 160–169. DOI: 10.7763/IJET.2015.V7.786

17. Xue Y., Luo Y., Wang Y., Xu X., Wan H.P., Shen Y., Fu W. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables: Computational framework and structural feasibility investigation // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 286. Article 116028. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116028

18. Wagner R. Bauen mit seilen und membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p.

19. Лапшин А.А., Ундалов А.М. Инженерная методика расчета конического радиально-балочного купола с мембранной кровлей // *Приволжский научный журнал*. 2016. № 3 (39). С. 9–16.

20. Клюев С.В., Ундалов А.М., Сабитов Л.С., Клюев А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов купола с мембранной кровлей // *Научные труды КубГТУ*. 2022. № 6. С. 1–8.

21. Guo J., Zhao Y., Mangalathu S., Liu G., Zhou G., Chen W. Control equation of feasible prestresses and feasibility of new types of rotating surface cable domes // *Engineering Structures*. 2021.

Vol. 246. Article 113000. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113000

22. Городецкий А.С., Городецкий А.В., Пиккуль А.В. Конструктивная нелинейность. Односторонние связи. Проблемы реализации // *International journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2016. Т. 12, вып. 3. С. 35–39. DOI: 10.22337/1524-5845-2016-12-3-35-39

23. Аверин А.Н., Пузаков А.Ю. Расчет систем с односторонними связями // *Строительная механика и конструкции*. 2015. №10. С. 15–32.

24. Игнатьев А.В., Бочков М.И. Алгоритм расчета систем с односторонними связями с заменой реакций опор на силовые неизвестные // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 5 (56). 7 с.

25. Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Бочков М.И. Применение метода конечных элементов в форме классического смешанного метода к расчету систем с односторонними связями // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2017. №2 (271). С. 52–61.

26. Игнатьев А.В., Бочков М.И., Курочкина И.В. Сравнительный анализ эффективности некоторых алгоритмов расчета систем с односторонними связями // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2019. № 11 (731). С. 87–98.

27. Кичеев В.Е. Рациональный способ решения канонических уравнений метода сил // *Качество и жизнь*. 2019. № 2 (22). С. 113–117.

28. Кичеев В.Е. Малозатратный способ решения канонических уравнений методом сил большой размерности // *Качество и жизнь*. 2020. № 3 (27). С. 33–38.

29. Krishnan S. Structural design and behavior of prestressed cable domes // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. Article 110294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110294

30. MAV.Structure. Расчет конструкций методом конечных элементов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bridgeart.ru/cad/59-cad/519-mavstructure.html> (дата обращения: 06.05.2024)

31. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. *Строительная механика*. М.: Высшая школа. 1986. 608 с.

Информация об авторах

Чесноков Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства. E-mail: andreychess742@mail.ru. Липецкий государственный технический университет. Россия, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

Михайлов Виталий Витальевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства. E-mail: mmvv46@rambler.ru. Липецкий государственный технический университет. Россия, 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

Поступила 13.04.2024 г.

© Чесноков А.В., Михайлов В.В., 2024

***Chesnokov A.V., Mikhailov V.V.**
 Lipetsk State Technical University
 *E-mail: andreychess742@mail.ru

TECHNIQUE FOR ANALYSIS OF HYBRID ROOF STRUCTURE OF THE STRUTTED TYPE

Abstract. Hybrid building structures have advantages in terms of efficiency of using high-strength materials and reducing deformations under load. To expand the scope of their practical application, it is necessary to improve techniques for structural analysis and design methods. The object of the present research is a hybrid structure of the strutted-type. The top chord of the structure is formed by rectilinear beams arranged in radial direction and pivotally connected in the ridge joint. The bottom chord consists of high-strength cable elements and hinge struts. For the static analysis of the structure, its flat model is adopted. The static indeterminacy is solved by means of the method of redundant reactions. The applicability of the method is justified by restriction of structural deformations implied by the serviceability limit state. Analytical expressions are proposed to determine the forces and bending moments in the main structural elements. The resulting expressions are unified to perform the structural analysis under pre-stress and external loads by means of supplementary parameters introduced. An improved technique for finding the matrix of coefficients and the vector of free terms of the canonical system of the method of redundant reactions is proposed. The technique allows automating the calculation. A method for taking into account flexible cable elements is developed. The method includes step-by-step eliminating of compressed cables from the design scheme. The results of the work contribute to the development of hybrid strutted-type structures and can be used for developing optimal design solutions, as well as to identify patterns of stress-strain state of the hybrid structures by means of the numerical simulation.

Keywords: hybrid building structure, strutted system, method of redundant reactions, flexible cable, pre-stress.

REFERENCES

1. Eremeev P.G. Metal hybrid structures of roofs [Metallicheskie kombinirovannye konstruksii pokrytiy]. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2019. No. 2 (21). Pp. 30–40. (rus)
2. Al-Rousan R. The impact of cable spacing on the behavior of cable-stayed bridges. Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 91(7). Pp. 49–59. DOI: 10.18720/MCE.91.5
3. Mushchanov V., Protopopov I., Korsun O., Garifullin M. Definition of the rational geometry of the cable-beam cover over stadium tribunes. Procedia Engineering. 2015. No. 117. Pp. 1001–1012. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.209
4. Egorov V.V. Combined systems of the strutted type [Kombinirovannye sistemy shprengel'nogo tipa]. VII mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya internet-konferentsiya. Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii. Sbornik nauchnykh trudov. 2020. Pp. 13–16. (rus)
5. Basharov F.F., Nizameev V.G. Methodology for optimizing the design parameters of profiled roof slabs reinforced with a spangle system [Metodika optimizatsii konstruktivnykh parametrov plit pokrytiya iz profnastila, podkreplennogo shprengel'noy sistemoy]. Perspektivy nauki. 2018. No. 7 (106). Pp. 81–87. (rus)
6. Ding M., Shen Y., Wei Y., Luo B., Wang L., Zhang N. Preliminary design and experimental study of a steel-batten ribbed cable dome. Symmetry. 2021. Vol. 13, issue 11. Article 2136. DOI: 10.3390/sym13112136
7. Xue S., Wang Z., Li X., Liu R., Lu Z., Jing H., Fan Q., Liu T., Dezhkam M. Model test study on static performance of rib-patterned small rise-span ratio suspend-dome structure. Structures. 2022. Vol. 43. Pp. 1615–1628. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.070
8. Zhang A., Shangguan G., Zhang Y., Zou M., Wang J. Experimental study on static performance of fully assembled ridge-tube threading cable with annular-struts cable dome. Engineering Structures. 2023. Vol. 288. Article 116194. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116194
9. Ibragimov A.M., Gnedina L.Yu., Dolgusheva V.V. Problems of application and design of arched combined systems [Problemy primeneniya i proektirovaniya arochnykh kombinirovannykh sistem]. Vestnik of Volga state university of technology. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2021. No. 2. Pp. 25–35. (rus)
10. Xia Z., Jiang T., Yu T. Innovating arch structures with fiber-reinforced polymer composites: a review. Advances in Structural Engineering. 2023. Vol. 26, Iss. 13. Pp. 2341–2358. DOI: 10.1177/13694332231180373
11. Undalov A.M., Klyuev S.V., Sabitov L.S., Klyuev A.V. Experimental study of the stress-strain state of radial beam domes [Eksperimental'noe issle-

dovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya radial'no-balochnykh kupolov]. Engineering journal of Don. 2022. No. 12 (96). Pp. 521–530. (rus)

12. Sabitov L., Klyuev S., Undalov A., Mailyan L., Klyuev A., Fediuk R., Kashapov N., Akhtyamova L., Khezhev T., Zagidullin R. Comparison of the results of numerical and experimental studies of the design of a radial-beam dome with triangular membrane core-shells. Structures. 2023. Vol. 48. Pp. 1118–1127. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.037

13. Undalov A.M. Investigation of the stress-strain state of a radial-beam dome with a membrane roof [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya radial'no-balochnogo kupola s membrannoy krovley]. News KSUAE. 2015. No. 3 (33). Pp. 70–77. (rus)

14. Ziganshin A.D., Akhtyamova L.Sh., Sabitov L.S., Radaykin O.V., Kiyamov I.K. Numerical modeling of tower-type structures in ANSYS and Lira-Cad software complexes [Chislennoe modelirovanie konstruktivnykh sooruzheniy bashennogo tipa v programnykh kompleksakh ANSYS i Lira-Sapr]. Scientific and technical Volga region bulletin. 2021. No. 2. Pp. 65–67. (rus)

15. Arellano H., Gomez R., Tolentino D. Parametric analysis of multi-span cable-stayed bridges under alternate loads. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2019. No. 14(4). Pp. 543–567. DOI: 10.7250/bjrbe.2019-14.457

16. Coarita E., Flores L. Nonlinear analysis of structures cable – truss. International Journal of Engineering and Technology. 2015. No. 7(3). Pp. 160–169. DOI: 10.7763/IJET.2015.V7.786

17. Xue Y., Luo Y., Wang Y., Xu X., Wan H.P., Shen Y., Fu W. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables: Computational framework and structural feasibility investigation. Engineering Structures. 2023. Vol. 286. Article 116028. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116028

18. Wagner R. Bauen mit seilen und membranen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. 517 p.

19. Lapshin A.A., Undalov A.M. Engineering methodology for calculating a conical radial-beam dome with a membrane roof [Inzhenernaya metodika rascheta konicheskogo radial'no-balochnogo kupola s membrannoy krovley]. Privolzhsky scientific journal. 2016. No. 3 (39). Pp. 9–16. (rus)

20. Klyuev S.V., Undalov A.M., Sabitov L.S., Klyuev A.V. Investigation of the stress-strain state of dome elements with a membrane roof [Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov kupola s membrannoy krovley]. Scientific Works of the Kuban State Technological University. 2022. No. 6. Pp. 1–8. (rus)

21. Guo J., Zhao Y., Mangalathu S., Liu G., Zhou G., Chen W. Control equation of feasible pre-

stresses and feasibility of new types of rotating surface cable domes. Engineering Structures. 2021. Vol. 246. Article 113000. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113000

22. Gorodetskiy A.S., Gorodetskiy A.V., Pikul' A.V. Constructive nonlinearity. One-way connections. Implementation problems [Konstruktivnaya nelineynost'. Odnostoronnie svyazi. Problemy realizatsii]. International journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2016. Vol. 12, issue. 3. Pp. 35–39. (rus) DOI: 10.22337/1524-5845-2016-12-3-35-39

23. Averin A.N., Puzakov A.Yu. Calculation of systems with one-way connections [Raschet sistem s odnostoronnnimi svyazyami]. Construction mechanics and constructions. 2015. No. 10. Pp. 15–32. (rus)

24. Ignat'ev A.V., Bochkov M.I. Algorithm for calculating systems with one-way connections with replacement of support reactions by force unknowns [Algoritm rascheta sistem s odnostoronnnimi svyazyami s zamenoy reaktsiy opor na silovye neizvestnyye]. Engineering journal of Don. 2019. No. 5 (56). 7 p. (rus)

25. Ignat'ev A.V., Ignat'ev V.A., Bochkov M.I. Application of the finite element method in the form of a classical mixed method to the calculation of systems with one-way connections [Primenenie metoda konechnykh elementov v forme klassicheskogo smeshannogo metoda k raschetu sistem s odnostoronnnimi svyazyami]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2017. No. 2 (271). Pp. 52–61. (rus)

26. Ignat'ev A.V., Bochkov M.I., Kurochkina I.V. Comparative analysis of the effectiveness of some algorithms for calculating systems with one-way connections [Sravnitel'nyy analiz effektivnosti nekotorykh algoritmov rascheta sistem s odnostoronnnimi svyazyami]. News of higher educational institutions. Construction. 2019. No. 11 (731). Pp. 87–98. (rus)

27. Kicheev V.E. A rational way to solve canonical equations of the method of forces [Ratsional'nyy sposob resheniya kanonicheskikh uravneniy metoda sil]. Quality and life. 2019. No. 2 (22). Pp. 113–117. (rus)

28. Kicheev V.E. A low-cost method for solving canonical equations by the method of large-dimensional forces [Malozatratnyy sposob resheniya kanonicheskikh uravneniy metodom sil bol'shoy razmernosti]. Quality and life. 2020. No. 3 (27). Pp. 33–38. (rus)

29. Krishnan S. Structural design and behavior of prestressed cable domes. Engineering Structures. 2020. Vol. 209. Article 110294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110294

30. MAV. Structure. Calculation of structures by the finite element method [Raschet konstruktivnykh

metodom konechnykh elementov]. [Electronic resource]. URL: <http://www.bridgeart.ru/cad/59-cad/519-mavstructure.html> (date of treatment: 06.05.2024)

31. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. Structural mechanics [Stroitel'naya mekhanika]. Moscow: Vysshaya shkola. 1986. 608 p. (rus)

Information about the authors

Chesnokov, Andrei V. PhD, Assistant professor. E-mail: andreychess742@mail.ru. Lipetsk State Technical University. Russia, 398055, Lipetsk, st. Moskovskaya, 30

Mikhailov, Vitalii V. DSc, Professor. E-mail: mmvv46@rambler.ru. Lipetsk State Technical University. Russia, 398055, Lipetsk, st. Moskovskaya, 30

Received 13.04.2024

Для цитирования:

Чесноков А.В., Михайлов В.В. Методика расчета комбинированной конструкции покрытия шпренгельного типа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 60–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-60-71

For citation:

Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Technique for analysis of hybrid roof structure of the strutted type. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 60–71. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-60-71

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-72-80

*Дмитриева Т.Л., Черняго А.Б.

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*E-mail: dmitrievat@list.ru

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. В статье рассмотрены методы управления информационной моделью автомобильной дороги на этапе эксплуатации. Показана комплексная методика проверки транспортно-эксплуатационных показателей, которая позволяет прогнозировать состояние дорожного покрытия, определять вероятность возникновения деформаций и разрушений во время эксплуатации дороги. Представлен программный модуль для оценки ремонтпригодности дороги с учётом всех ключевых транспортно-эксплуатационных показателей. На основе этого модуля можно рассчитать реальные межремонтные сроки службы для определённых участков дороги. В алгоритмах разработанной программы предусмотрена передача данных на различных этапах жизненного цикла, заложен этап создания среды общих данных, взаимодействие с атрибутами IFC. Такой подход обеспечивает interoperability информационной модели дороги, позволяет оценить, как текущее ее состояние, так и планируемые меры по устранению строительных недочётов или дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации, что обеспечивает продление срока службы дороги. Исследованы популярные реологические модели для прогнозирования остаточных деформаций дорожных одежд на основе анализа различных моделей упругопластического поведения грунта нелинейной механики грунтов. Выявлено, что наиболее адекватной является модель, использующая теорию наследственной ползучести, которая учитывает расчет нежестких дорожных одежд, подверженных воздействию кратковременной нагрузки от движущихся автомобилей. Приведены некоторые аспекты ремонтпригодности дорожного объекта, влияющие на экологические и экономические показатели окружающей среды.

Ключевые слова: ремонтпригодность, жизненный цикл, информационная модель дороги, математическая модель, среда общих данных.

Введение. Ремонтпригодность – важный фактор, влияющий на качество и надёжность объектов капитального строительства [1]. Это свойство объекта, которое позволяет легко и быстро устранить возникающие неисправности или заменить вышедшие из строя компоненты. В данной статье представлен разработанный авторами программный модуль автоматизированной оценки ремонтпригодности автомобильной дороги. Отмечена важность ремонтпригодности объекта для экологических и экономических показателей, которая состоит в возможности сокращения времени простоя данного объекта, что, в свою очередь, снижает затраты на его эксплуатацию [2].

Для оценки показателей ремонтпригодности автомобильной дороги и контроля состояния дороги без регулярного сезонного и ежегодного мониторинга предлагается использовать исполнительную документацию, акты приёмки после сдачи объекта в эксплуатацию, а также данные диагностики, полученные в конце межремонтного периода. Таким образом, можно получить представление о состоянии дороги и разработать стратегию управления им в будущем. Для этой цели был разработан алгоритм и соответствующая программа проверки эксплуатируемого дорожного объекта по ключевым его параметрам. Расчёты производятся на основе полученной

съёмки местности, проектных данных и данных полученных после этапа строительства автомобильной дороги. Результатом расчёта данного программного модуля является показатель фактического транспортно-эксплуатационного состояния данного сооружения. Проверка включает множество параметров, влияющих на безопасность и качество движения, в том числе состояние и прочность дорожной одежды. На основе разработанной программы, а также с использованием информационного и математического моделирования построен метод эффективного управления этапом эксплуатации объектов дорожного хозяйства.

Таким образом, научная сторона данного исследования состоит в разработке алгоритма прогнозирования транспортно-эксплуатационных (с учётом климатических характеристик) параметров автомобильной дороги, на основе которого определяется состояние конструкций конкретного участка. В данном алгоритме актуализация данных происходит геоинформационными системами (ГИС), а после завершения этапа эксплуатации предусматривается сопровождение последующих этапов: предпроекта и проекта на ремонт, капитальный ремонт или реконструкцию автомобильной дороги.

Материалы представленных исследований могут быть использованы компаниями дорожно-

строительной отрасли, применяющими или внедряющими у себя PLM-системы (Product Lifecycle Management).

Материалы и методы. Оценка показателей ремонтпригодности автомобильной дороги должна быть встроена в общую информационную модель дороги (ИМД) [4]. Это возможно, в том числе, при помощи ERP-систем с web-ориентированной средой общих данных (СОД) и использованием web-систем для хранения и управления информационными моделями.

Создание перспективной RIM-модели (Road Information Modelling) позволит эффективно управлять процессом строительства и эксплуатации дорог, обеспечивая соблюдение нормативных требований и автоматическую корректировку проектов на всех стадиях жизненного цикла [5, 6].

Приведём общую методику создания и управления информационной моделью автомобильной дороги на различных этапах ее жизненного цикла [7] (рис. 1) с одновременным созданием среды общих данных.

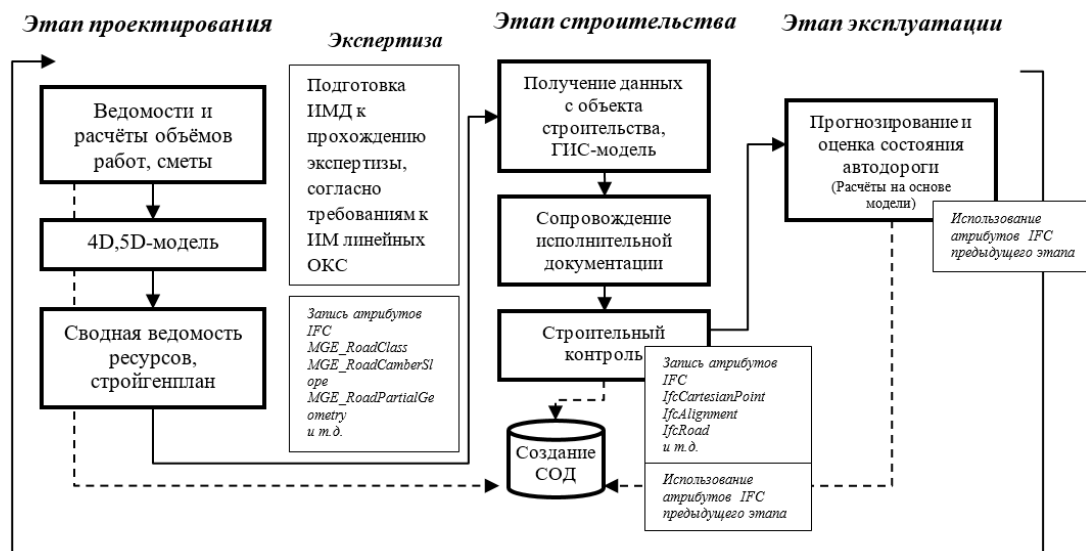


Рис. 1. Блок-схема разработанной методики создания информационной модели автомобильной дороги на различных этапах ее жизненного цикла

Для создания СОД была применена ERP-система (планирование ресурсов предприятия) Arrius-PLM, которая сопровождает информационную модель дороги на всех этапах жизненного цикла, что даёт возможность управлять персоналом и определять наиболее эффективные формы

организации труда [8]. Интеграция разработанной авторами программы в такую ERP-систему позволяет эффективно применять нормативные документы, а также создавать и хранить базы данных обследования, диагностики и паспортизации автомобильной дороги (рис.2).

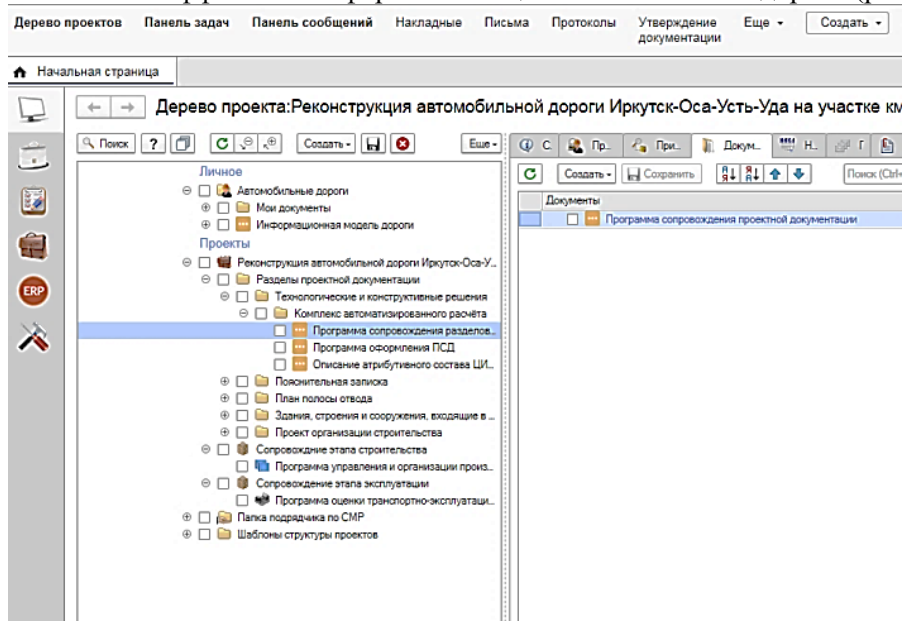


Рис. 2. Работа с программными модулями в СОД для сопровождения модели автомобильной дороги на различных этапах её жизненного цикла в программе Arrius-PLM

В алгоритмах разработанной программы заложено взаимодействие с атрибутами IFC. Такой подход обеспечивает интероперабельность ИМД, позволяя, например, соблюсти требования к цифровым информационным моделям линейных объектов капитального строительства, предоставляемым для проведения экспертизы [9]. Также задание атрибутов обеспечит эффективные операции по сбору, хранению, обработке, интеграции и передаче данных, их мониторинга, актуализации и анализа, валидации и верификации [10, 11].

Основная часть. Следует отметить, что прогнозирование эксплуатационных характеристик дороги на долгосрочную перспективу затруднено из-за отсутствия адекватных моделей, которые бы учитывали взаимодействие всех её конструктивных элементов [12]. Чтобы оценить показатели ремонтпригодности необходима исполнительная документация, акты ввода объекта в эксплуатацию, а также данные обследования дороги. Используя эти данные можно произвести расчёты, которые позволят спрогнозировать состояние объекта для назначения возможных мер по устранению недостатков, препятствующих дальнейшей эксплуатации объекта.

1. Расчет межремонтных сроков в процессе эксплуатации дороги.

Одним из важных показателей выхода из состояния нормальной эксплуатации дороги является появление остаточных деформаций в ее покрытии. На основе математического моделирования деформационно-прочностных характеристик дорожной одежды можно вычислить значение абсолютной деформации ее поверхности, после чего есть возможность рассчитать время достижения конструкцией критической величины этой деформации и, таким образом, выявить межремонтный срок службы данной дорожной одежды. Расчёт этих показателей в программе производится с помощью модуля деформационного расчёта *RP_def* (*Road pavement deformations*). Алгоритм программы основан на модели дорожной одежды (рис. 3) и использует исходные и исполнительные данные (характеристики грунтов из инженерно-геологических отчётов) и параметры, полученные в ходе экспресс-диагностики (с использованием передвижной дорожной лаборатории). Расчёты учитывают динамические и статические воздействия от движущегося транспорта, механические свойства грунтов, природные факторы, результаты мониторинга, а также действующие нормы и правила.

Предварительно были проанализированы 3 популярные реологические модели упругопластического поведения грунта для прогнозирования остаточных деформаций дорожных одежд:

- 1) упругопластическая модель с изотропным упрочнением (HSM);
- 2) идеально-упругопластическая модель с критерием прочности Мора – Кулона;
- 3) модель, использующая теорию наследственной ползучести и соотношение Больцмана – Вольтерра, которая исследована в монографии Ерёмкина В.Г. и Волокитиной О.А. [13].

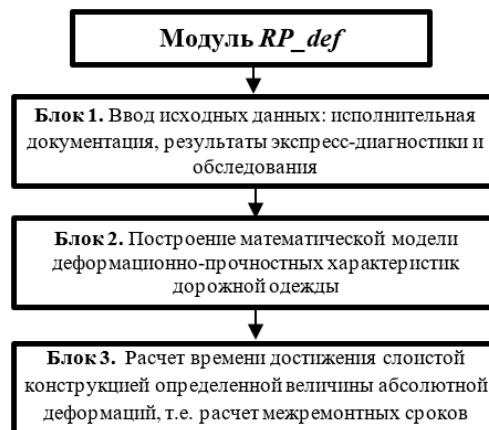


Рис. 3. Основные блоки модуля *RP_def*

Выявлено, что математическая модель Кулона-Мора и модель упрочняющегося грунта обладают главным недостатком – их непригодностью для моделирования динамических процессов, что не позволяет адекватно определить деформации конструктивных слоёв дорожной одежды и земляного полотна от воздействия автомобильной колесной нагрузки [14]. На основании этого была принята модель 3, которая учитывает критерий предельного состояния для расчета нежестких дорожных одежд, подверженных воздействию кратковременной нагрузки от движущихся автомобилей. Достоверность принятой модели была подтверждена экспериментально.

При расчёте по этой модели задействованы национальные стандарты, откуда берутся значения климатических параметров определённого региона и используются для автоматизации и универсализации модели состояния дорожного покрытия. Это позволяет учитывать местные материалы и расчётные характеристики для каждого субъекта страны.

2. Оценка состояния автомобильной дороги.

Для оценки текущего состояния автомобильной дороги разработан алгоритм проверки по ее ключевым параметрам согласно нормативному документу ОДН 218.0.006-2002. Расчёт производится на основе полученной съёмки местности, проектных данных и данных взятых после этапа строительства автомобильной дороги. Результатом расчёта является значение обобщённого показателя качества и состояния дороги, которое позволяет определить фактическое транспортно-

эксплуатационное состояние данного сооружения.

Обобщенный показатель качества автомобильной дороги P_d находится по выражению:

$$P_d = K_{Пд} \cdot K_{об} \cdot K_э. \quad (1)$$

Сюда входят:

- комплексный показатель ТЭС АД ($K_{Пд}$),
- показатель инженерного оснащения и обустройства ($K_{об}$),
- показатель уровня содержания в период эксплуатации ($K_э$).

Фактические значения величин $K_{об}$ могут изменяться в диапазоне от 0,85 до 1,0 в зависимости от полноты обустройства дороги. Значения параметра $K_э$ меняются от 0,5 до 1,1.

Комплексный показатель ТЭС АД $K_{Пд}$ определяется как сумма комплексных показателей ее участков $K_{П_i}$ ($i=1,2 \dots n$)

$$K_{Пд} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{П_i} \cdot l_i}{L}. \quad (2)$$

здесь L – общая длина дороги, км; l_i – длина i -го участка, км; n – число участков.

Показатель $K_{П_i}$ оценивается итоговым коэффициентом обеспеченности расчетной скорости $K_{рси}^{итог}$ на данном участке. Он принимается равным *наименьшему* значению из всех частных коэффициентов на участке i .

$$K_{П_i} = K_{рси}^{итог} = K_{рси}^{min}. \quad (3)$$

Перечень частных коэффициентов обеспеченности расчетной скорости $K_{рси(1-10)}^{итог}$ согласно ОДН 218.0.006-2002 показан в таблице 1.

Таблица 1

Учет влияния частных коэффициентов $K_{рс}$

Частный коэффициент $K_{рс}$	Учет влияния
$K_{рс(1)}$	Ширины основной укрепленной поверхности
$K_{рс(2)}$	Ширины и состояния обочин
$K_{рс(3)}$	Интенсивности и состава движения
$K_{рс(4)}$	Продольного уклона и видимости поверхности дороги
$K_{рс(5)}$	Радиуса кривых в плане
$K_{рс(6)}$	Продольной ровности покрытия
$K_{рс(7)}$	Сцепных качеств покрытия
$K_{рс(8)}$	Состояния и прочности дорожной одежды
$K_{рс(9)}$	Поперечной ровности покрытия (колеи)
$K_{рс(10)}$	Безопасности движения

Нормативное состояние дороги означает, что её параметры и характеристики обеспечивают комплексный показатель ТЭС АД не ниже нормативного $K_{Пн}$ в течение всего осенне-весеннего периода, то есть выполняется условие:

$$K_{Пд} \geq K_{Пн}. \quad (4)$$

На основе представленной методики авторами разработан программный модуль проверки по ключевым параметрам дороги *Check_RC*

(*Checking road condition*) (рис. 4). Исходные данные (ширина проезжей части, количество полос движения, ширина разделительной полосы, ширина укрепленной поверхности дорожной одежды, ширина обочин, величины продольных уклонов, радиусы кривых в плане, расстояние видимости и т.д.) определялись актуальной съёмкой местности.

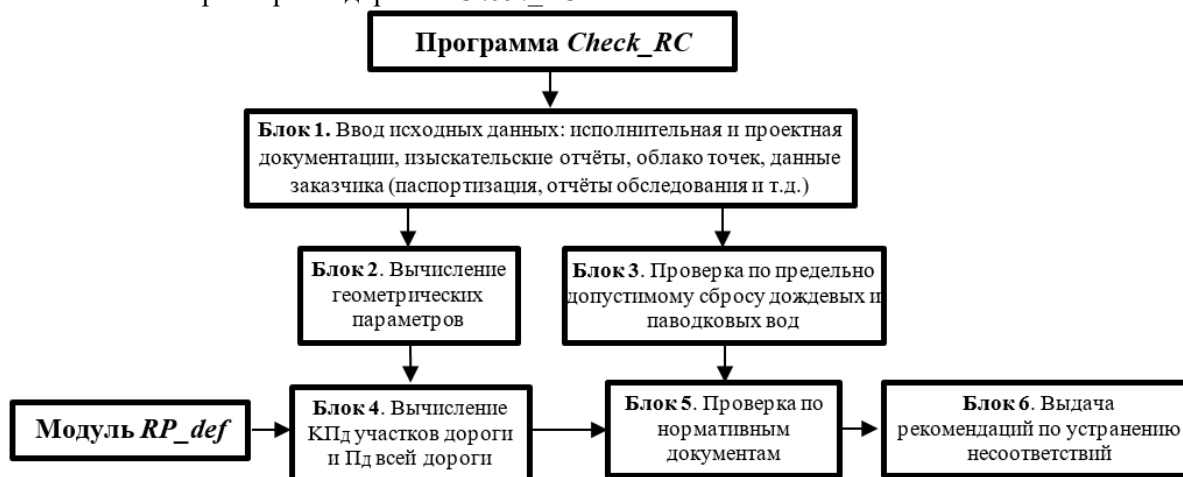


Рис. 4. Основные блоки программы *Check_RC*

По результатам расчётов на определённом периоде эксплуатации программой будут выделены участки дороги, не удовлетворяющие нормативным требованиям ($KPI < KPI_n$). После появления таких участков, будет доступна возможность получить рекомендации по устранению несоответствий. На основе внесения соответствующих исправлений, модель перестраивается, а отслеживание оценки состояния данного объекта продолжается. Например, если в процессе диагностики или обследования были обнаружены дефекты покрытия, то будут предложены варианты по устройству поверхностной обработки, ямочного ремонта и других работ по восстановлению изношенного слоя покрытия. Такие рекомендации позволят избежать расходов на более капитальные меры устранения дефектов, например, таких как полная замена покрытия дороги [15, 16]. Если причиной неудовлетворительного состояния конструкции стали источники переувлажнения земляного полотна и/или дорожной одежды, то по геометрической модели этого участка дороги будут определены места застоя воды, и далее, для последующего этапа проектирования будут назначены рекомендации по составлению проектов продольных, поперечных уклонов проезжей части и кюветов.

Если общий объём восстановленных и неудовлетворительных участков дороги превышают нормативные требования, программой будет назначен капитальный ремонт.

3. Проверка по предельно допустимому сбросу дождевых и паводковых вод.

Программа *Check_RC* выполняет также проверку по предельно допустимому сбросу дождевых и паводковых вод согласно СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» и «Рекомендациям по учету требований по охране окружающей среды при проектировании автомобильных дорог и мостовых переходов» (Блок 3).

В качестве исходных данных принимаются климатические параметры, площадь участка автодороги и средний продольный уклон участка дороги. Оценка загрязнения поверхностного стока (сброса) с автомобильной дороги и определение необходимости её очистки производится расчетом на основе фактической концентрации загрязняющего вещества в поверхностном стоке, расчетного расхода поверхностных сточных вод (дождевых или паводковых), и предельно допустимого содержания (концентрации) загрязняющего вещества в поверхностном стоке с учетом смешения его с водами водотока.

4. Описание интерфейса программы.

На рис. 5 представлен интерфейс реализации программы *Check_RC*. В окно ввода (рис. 5, а) необходимо ввести информацию об автомобильной дороге. Большинство данных определяется на этапе проектирования. На основе этой информации создаётся графическое представление состояния участка дороги (рис. 5, б) и список рекомендаций по устранению различных эксплуатационных проблем. Это позволяет предпринимать действия, соответствующие нормативным документам и методическим рекомендациям, учитывая текущее состояние дороги.

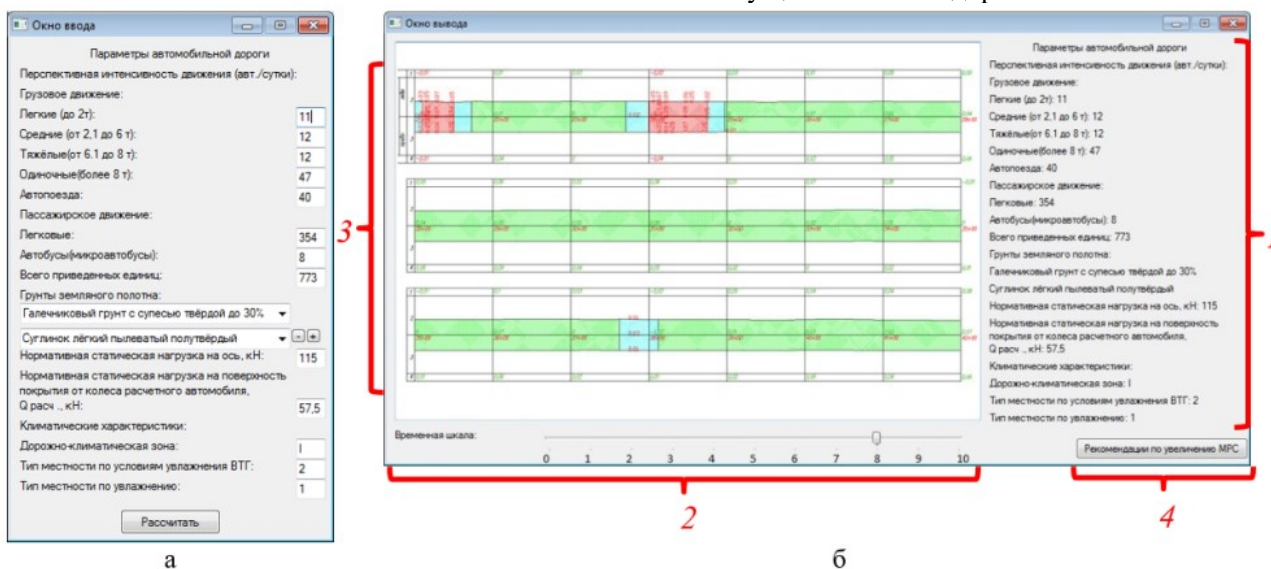


Рис. 5. а) Окно ввода известных параметров автомобильной дороги.

б) Окно вывода состояния автомобильной дороги с отображением проблемных участков

На рис. 5, б представлены:

Зона 1 включает входные параметры автомобильной дороги, которые непосредственно влияют на создание её математической модели.

Зона 2 представляет собой временную шкалу, позволяющую оценить состояние дороги в течение определённого времени после начала

эксплуатации (на основе данных из модуля RP_def).

Зона 3 содержит спрямлённый план участка дороги, полученный в результате расчётов модели и показывающий проблемные зоны, не соответствующие нормативным требованиям.

Зона 4 кнопка для получения рекомендаций по продлению межремонтного периода. После активации проблемные участки будут выделены красным цветом, и станет возможным получение рекомендаций по устранению проблем. Участки, которые были восстановлены по рекомендациям, предложенным данной программой выделяются синим цветом.

На основе внесения соответствующих исправлений (по выданным рекомендациям), модель перестраивается, а отслеживание оценки состояния данного объекта продолжается.

Выводы. Программный модуль Check_RC оценивает показатели ремонтпригодности автомобильной дороги, определяет её состояние и качество, а также рассчитывает реальные межремонтные сроки службы участка дороги. Результаты анализа позволяют выявить недостатки и предложить способы их устранения, что помогает предотвратить ошибки и дефекты в период эксплуатации дороги, обеспечивая тем самым увеличение срока службы дороги.

Предложенный подход существенно эффективнее ситуации, существующей сегодня, когда производится множество расчетов, лишь в целом отображающих пригодность дороги для дальнейшей ее эксплуатации. Следует отметить, что использование ремонтпригодных продуктов способствует снижению загрязнения окружающей среды. Это связано с тем, что при ремонте используются уже существующие компоненты без их утилизации и замены новыми. Разработанная методика, когда своевременно назначенными мероприятиями можно фактически отсрочить капитальный ремонт, позволит сократить потребление энергии и ресурсов, необходимых для производства новых материалов и компонентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Порфирьев Б.Н., Скубачевская Н.Д., Миллякин С.Р. Оценка эффективности затрат на модернизацию автомобильных дорог в России в целях их адаптации к климатическим изменениям и снижения риска ДТП // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6 (201). С. 103–118. DOI: 10.47711/0868-6351-201-103-118.
2. Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Качество, эксплуатационные свойства и экологическая безопасность автомобильной дороги в контексте устойчивого экономического развития // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 5. С. 179–197. DOI:10.31675/1607-1859-2023-25-4-179-197.
3. Горячев М.Г., Лугов С.В., Калёнова Е.В. Анализ некоторых параметров зависимости для определения требуемой прочности нежестких дорожных одежд при обосновании конструктивного решения по их усилению // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 2 (24). С. 415–419.
4. Жук А.Ю., Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Болтнев Д.Е., Высоцкая И.А. Исследование математической модели рельефа местности при проектировании автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2 (50). С. 88–93. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-2-88-93.
5. Рябова О.В., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Тихомиров П.В. Изучение географической среды для целей дорожного проектирования // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 1 (57). С. 84–95. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.008.
6. Дмитриева Т.Л., Яценко В.П., Курышов И.А. BIM как средство сквозного проектирования, технологии возведения и эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 2. С. 252–261. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-252-261.
7. Дмитриева Т.Л., Черняго А.Б. Взаимодействие цифровой модели и пространственных данных на всех этапах жизненного цикла в информационном моделировании дорожной отрасли // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее. Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института. Красноярск, 2022. С. 314–319.
8. Eleftheriadisa S., Mumovica D., Greeningb P. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. No. 67. Pp. 811–825.
9. Документация по использованию классов IFC [Электронный ресурс]. URL: https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML дата обращения: 20.04.2024).
10. Ho S., Rajabifard A. Towards 3D-enabled urban land administration: Strategic lessons from the BIM initiative in Singapore // Land Use Policy. 2016. No. 57. Pp. 1–10.
11. Гинзбург А.В. BIM-технологии на протяжении жизненного цикла строительного объекта

// Информационные ресурсы России. 2016. № 5(153). С. 28–31.

12. Дубровский А.В., Ершов А.В., Новоселов Ю.А., Москвин В.Н. Элементы геоинформационного обеспечения инвентаризационных работ // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22. № 4. С. 78–91.

13. Ерёмин В.Г., Волокитина О.А. Метод определения расчетных характеристик конструктивных слоев нежестких дорожных одежд. Воронеж: ВГАСУ, 2010. С. 228–233.

14. Черняго А.Б., Дмитриева Т.Л. Применение популярных математических моделей упругопластического поведения грунта для прогнозирования остаточных деформаций дорожных

одежд в практике геотехнического моделирования // Конференция «Взаимодействие науки, образования и производства» – Октябрь, 2019, Иркутск – Изд-во: Иркутский национальный исследовательский технический университет. С. 54–62.

15. Фонтокина В.А., Савенко А.А., Самарский Е.Д. Роль BIM-технологий в организации и технологии строительства // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 1 С. 56–64.

16. Ilhan B., Yaman H. Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions. Automation in Construction. 2016. No. 70. Pp. 26–37.

Информация об авторах

Дмитриева Татьяна Львовна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики и сопротивления материалов ИРНИТУ. E-mail: dmitrievat@list.ru. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Черняго Андрей Борисович, аспирант кафедры механики и сопротивления материалов ИРНИТУ. E-mail: abs706080@gmail.com. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Поступила 04.06.2024 г.

© Дмитриева Т.Л., Черняго А.Б., 2024

***Dmitrieva T.L., Chernyago A.B.**

Irkutsk National Research Technical University

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

THE ASSESSMENT OF HIGHWAY MAINTAINABILITY INDICATORS

Abstract. The methods of managing the information model of the road at the operation stage are presented. A comprehensive methodology for checking transport and operational indicators is shown. It allows to predict the condition of the road surface, to determine the probability of deformations and destruction during the operation of the road. A software module is presented for assessing the maintainability of the road, taking into account all key transport and operational indicators. Based on this module, one can calculate the real overhaul service life for certain sections of the road. In the algorithms of the developed program, data transmission at various stages of the life cycle is provided, the stage of creating a general data environment, interaction with the IFC attributes is laid. This approach ensures the interoperability of the information model of the road and allows to evaluate current condition and planned measures to eliminate construction flaws or defects formed during operation, which ensures the extension of the road service life. Popular rheological models have been investigated for predicting residual deformations of road clothing based on the analysis of various models of the soil behavior of nonlinear soil mechanics. It is revealed that the most adequate model is a model that uses the theory of hereditary creep, which takes into account the calculation of non-rigid road clothing, which is exposed to short-term load from moving cars. Some aspects of the maintainability of the road facility affecting the environmental and economic indicators of the environment are given.

Keywords: maintainability, life cycle, information model of the road, mathematical model, general data.

REFERENCES

1. Porfirev B.N., Skubachevskaya N.D., Milya-kin S.R. Cost-effectiveness assessment for the roads upgrading to adapt to climate change and reduce the risk of traffic accidents in Russia [Ocenka effektivnosti zatrat na modernizaciyu avtomobil'nyh dorog v Rossii v celyah ih adaptacii k klimaticheskim

izmeneniyam i snizheniya riska DTP]. Studies on Russian Economic Development. 2023. Vol. 34. No. 6. Pp. 794–804. DOI: 10.1134/S1075700723060114. (rus)

2. Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Quality, operating properties and environmental safety of automobile road in sustainable economic development [Kachestvo, ekspluatatsionnye svoystva i

ekologicheskaya bezopasnost' avtomobil'noj dorogi v kontekste ustojchivogo ekonomicheskogo razvitiya]. Journal of Construction and Architecture. 2023. No. 25 (5). Pp. 179–197. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-179-197. (rus)

3. Goryachev M.G., Lugov S.V., Kalyonova E.V. Analysis of some dependence parameters for determining the required strength of flexible pavements when justifying the constructive decision to strengthening them [Analiz nekotorykh parametrov zavisimosti dlya opredeleniya trebuemoj prochnosti nezhyostkih dorozhnyh odezhd pri obosnovanii konstruktivnogo resheniya po ih usileniyu. Avtomobil']. Car. Road. Infrastructure. 2020. No. 2 (24). Pp. 415–419. (rus)

4. Zhuk A.Yu., Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Boltnev D.E., Vysockaya I.A. Investigation of the mathematical model of the terrain in the design of highways [Issledovanie matematicheskoy modeli rel'efa mestnosti pri proektirovanii avtomobil'nyh dorog]. Systems Methods Technologies 2021. No. 2 (50). Pp. 88–93. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-2-88-93. (rus)

5. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tihomirov P.V. Studying a Geographical Environment for Road Design Purposes [Izuchenie geograficheskoy sredy dlya celej dorozhnogo proektirovaniya]. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. No. 1 (57). Pp. 84–95. DOI: 10.25987/VSTU.2020.57.1.008. (rus)

6. Dmitrieva T.L., Yashchenko V.P., Kuryshov I.A. BIM as a means of end-to-end design, construction, and operation. [BIM kak sredstvo skvozno go proektirovaniya, tekhnologii vozvedeniya i ekspluatatsii]. Izvestiya vuzov Investitsii Stroitelstvo Nedvizhimost. 2023. Vol. 13. No. 2. Pp. 252–261. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-252-261. (rus)

7. Dmitrieva T.L., Chernyago A.B. The interaction of the digital model and spatial data at all stages of the life cycle in the information modeling of the road industry [Vzaimodejstvie cifrovoj modeli i prostranstvennykh dannykh na vseh etapah zhiznennogo cikla v informacionnom modelirovanii dorozhnoy otrasli. Aktual'nye voprosy stroitel'stva: vzglyad v budushchee]. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific and Practical conference dedicated to the 40th anniversary of the establishment of the Institute of Civil Engineering. Krasnoyarsk. 2022. Pp. 314–319. (rus)

8. Eleftheriadisa S., Mumovica D., Greeningb P. Life cycle energy efficiency in building structures:

A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. No. 67. Pp. 811–825.

9. Documentation on the use of IFC classes [Dokumentatsiya po ispol'zovaniyu klassov IFC]. URL: https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML (date of treatment: 20.04.2024). (rus)

10. Ho S., Rajabifard A. Towards 3D-enabled urban land administration: Strategic lessons from the BIM initiative in Singapore. Land Use Policy. 2016. No. 57. Pp. 1–10.

11. Ginzburg A.V. BIM technologies throughout the life cycle of a construction site [BIM-tekhnologii na protyazhenii zhiznennogo cikla stroitel'nogo ob"ekta]. Information resources of Russia. 2016. No. 5(153). Pp. 28–31. (rus)

12. Dubrovskij A.V., Ershov A.V., Novoselov Yu.A., Moskvina V.N. Elements of geoinformation support for inventory works [Elementy geoinformacionnogo obespecheniya inventarizacionnykh rabot]. Vestnik SGUGiT. 2017. Vol. 22. No. 4. Pp. 78–91. (rus)

13. Eryomin V.G., Volokitina O.A. Method of definition of estimated performances of constructive layers of non-rigid road clothes [Metod opredeleniya raschetnykh harakteristik konstruktivnykh sloev nezhestkiy dorozhnyh odezhd]. Voronezh: VGASU, 2010. Pp. 228–233. (rus)

14. Chernyago A.B., Dmitrieva T.L. Application of popular mathematical models of elastic-plastic behavior of soil to predict residual deformations of road surfaces in the practice of geotechnical modeling [Primenenie populyarnykh matematicheskikh modelej uprugoplasticheskogo povedeniya grunta dlya prognozirovaniya ostatochnykh deformatsiy dorozhnyh odezhd v praktike geotekhnicheskogo modelirovaniya]. The conference "Interaction of science, education and production". 2019. Pp. 54–62. (rus)

15. Fontokina V.A., Savenko A.A., Samarskij E.D. The role of BIM technologies in the construction economy [Rol' BIM-tekhnologij v organizatsii i tekhnologii stroitel'stva]. The Eurasian Scientific Journal. 2022. No. 14(1). Pp. 56–64. (rus)

16. Ilhan B., Yaman H. Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions. Automation in Construction. 2016. No. 70. Pp. 26–37.

Information about the authors

Dmitrieva, Tatiana L. DSc, Head of Department of Mechanics and Strength of Materials. E-mail: dmitrievat@list.ru. Irkutsk National Research Technical University, Lermontov street, 83, Russia, Irkutsk, 664074.

Chernyago, Andrey B. Graduate student. E-mail: abs706080@gmail.com. Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Russia, Irkutsk 664074.

Received 04.06.2024

Для цитирования:

Дмитриева Т.Л., Черняго А.Б. Оценка показателей ремонтпригодности автомобильной дороги // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 72–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-72-80

For citation:

Dmitrieva T.L., Chernyago A.B. The assessment of highway maintainability indicators. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9 Pp. 72–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-72-80

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-81-94

Шеин В.В.

Донской государственный технический университет

E-mail: va_in@list.ru

ЭСТЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВХОЖДЕНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СТРУКТУРУ ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ

Аннотация. В статье представлены модели эстетического формирования реконструируемых промышленных объектов советского периода в окружающую застройку в контексте устойчивости на уровне структуры города с учетом роста городской ткани. Рассматриваемые промышленные предприятия, как правило, расположенные изначально на периферии города вследствие динамики урбанизационных процессов плотно вросли в городскую ткань, и в настоящий момент являются так называемыми зонами отчуждения, поскольку являются крупногабаритными относительно объектов окружающей застройки, в том числе селитьбы и элементов инфраструктуры ее социально-бытового обслуживания. Также необходимо отметить предприятия, являющиеся градообразующими и расположенные в структуре исторического центра городского поселения, где особенно важно сохранить аутентичность исторической застройки, т.е. максимально деликатно ввести реконструируемые промышленные объекты (осуществить выбор эстетической модели реконструируемого предприятия) в исторически сложившийся визуально-эстетический код города. Таким образом, выявлены две модели эстетического вхождения восстанавливаемых существующих промышленных предприятий в структуру города: мимикрирующая, относящаяся к объектам, расположенным в исторической части города и акцентная – формирующая визуальный центр притяжения вне исторической части города, на периферии и за пределами города. В статье также рассмотрены варианты эстетического вхождения реконструируемых промышленных объектов в зависимости от их градостроительных особенностей: наличием буферных зон и СЗЗ, наличием внешних путей железнодорожного транспорта, прилегающих к объектам.

Ключевые слова: промышленные здания, концептуальные модели промышленных объектов, реконструкция промышленных зданий, промышленная архитектура, эстетика фасадов промышленных зданий.

Введение. В настоящий момент, когда рост глобализации процессов достиг своего пика, уровень урбанизации не только имеет тенденцию, но на деле характеризуется как мегаструктура, автоматически поглощающая более мелкие градообразования [1–5]. Не говоря уже о Москве, но на примере Ростовской конурбации, которая поглощает все большие территории, выход за границы города и сращение городских поселений, формирует живой городской каркас. Существующие крупные промышленные здания советского периода, являющиеся, как правило, градообразующими, т.е. формирующими становление и последующее развитие каркаса, не могут не оказывать влияние на уже существующую и вновь возводимую застройку [6–10].

Вопрос использования существующих промышленных объектов, как эксплуатируемых, так и неэксплуатируемых, в настоящий момент актуализируется. Масса предприятий за последние годы возобновляют, расширяют, иначе говоря, модернизируют свою деятельность – так озаменовано начало настоящего периода в отношении использования существующих советских промышленных объектов – периода возрождения.

Эстетический компонент плотно вплелся в структуру комплексного анализа любого предмета антропогенной системы координат. Начиная с простейших артефактов и заканчивая сложнейшими многосоставными образованиями, такими, как городская ткань и ее составляющие, далеко не в последнюю очередь они воспринимаются с эстетической точки зрения, иначе говоря, в контексте вхождения промышленных объектов в структуру окружающей застройки, эстетический критерий существенно учитывается при оценке качества жизни в современной городской среде. Поскольку этот критерий состоит, в свою очередь, из анализа и синтеза формальных, цветологических компонентов среды, создаваемых на разных исторических этапах становления города, одной из важнейших архитектурных задач здесь становится – формирование целостного, эстетически ценного пространства, включающего эти компоненты и их взаимной увязки. Особое место при формировании облика градостроительной структуры занимает эстетическое понимание экологического каркаса и широты его возможностей. При разработке решений реконструкции восстанавливаемых промышленных объектов совет-

ского периода с акцентом на оптимизацию и прогностический характер этих решений необходимо обеспечить согласованность в работе всех компонентов обновляющейся производственной среды, включая эстетический, на основе принципа экологического каркаса, способствующего формированию композиционного единства реконструируемого объекта с окружающей застройкой и в структуре его генерального плана.

Методология. При проведении исследования использовался системно-структурный подход, гипотетико-дедуктивный метод, позволяющий обобщить рассматриваемые промышленные объекты в художественно-эстетическом контексте как самое целое и во взаимосвязи с окружающей застройкой в зависимости от размещения относительно структуры города и других классификаторов, относящихся к архитектурно-градостроительным. Также на всех этапах работы использовались такие методы исследования как индуктивный, сравнительный анализы статистических, графических и текстовых материалов, полученных из литературных источников; натурная фотофиксация и ее визуальный анализ, анализ влияния архитектурно-градостроительных, социально-психологических, художественно-эстетических факторов, влияющих на формирование визуального восприятия восстанавливаемых объектов промышленной архитектуры советского периода в аспекте их корреляции с окружающей застройкой.

Основная часть.

Цель исследования: вывести модели эстетического формирования восстанавливаемых промышленных объектов в структуре окружающей застройки.

Задачи исследования:

- проанализировать особенности расположения восстанавливаемых промышленных объектов в структуре окружающей застройки в динамике урбанизационного процесса;
- вывести концептуальные модели восстанавливаемых промышленных объектов на уровне структуры города и генерального плана;
- выявить основные эстетические модели восстанавливаемых промышленных объектов в структуре окружающей застройки.

Объект исследования: закономерности эстетического формирования восстанавливаемых промышленных объектов советского периода в структуре окружающей застройки.

Производственное предприятие как структура имеет градообразующий характер. Исторически сложилось, что наряду с фортификационными объектами, место приложения труда человека детерминируется в полифункциональное градостроительное образование [11–15]. Таким

образом, большинство крупных промышленных предприятий Юга России и вновь присоединенных территорий находятся в непосредственной близости от жилья, однако существуют и те, которые ввиду типа производства (тяжелое машиностроение, химическая промышленность и т.п.) расположены в структуре города, но вне непосредственной близости от жилья (Красный Котельщик, РЭВЗ).

Восстанавливаемые производственные предприятия, сформированные изначально как периферийные объекты в силу многолетнего процесса урбанизации, динамика которого только растет, обросли большими селитебными массивами с инфраструктурой их обслуживания, причем настолько основательно, что такие образования часто стали называться «центром», как например РНИИРС, завод ЖБК и прочие предприятия, сформировавшие промышленную зону ул. Нансена в г. Ростове-на-Дону, вдоль которой расположены пути железнодорожного транспорта – они и являлись границей города. Тем не менее, за последние менее, чем 50 лет, он настолько вышел за границы этих путей, что улица Нансена является не то, что периферийной – она по сути делит город на равные – северную и южную части. Причем, этот пример подкрепляется множеством аналогичных – Нижний Новгород и т.д. Таким образом сформировалась и продолжает усугубляться чересполосица и часто – разрывы городской ткани вследствие влияния определенных факторов, которые формируют классификацию восстанавливаемых промышленных объектов советского периода на уровне города:

А) По расположению относительно структуры города [16–20] (рис. 1):

- в структуре города, вблизи селитебной зоны;

Крупные промышленные узлы, как Ростсельмаш, НЭВЗ являются по сути хрестоматийными примерами промышленного предприятия, послужившего градостроительным ядром селитебной структуры городского района (Ростсельмаш – Первомайский район) и поселка (НЭВЗ). Промышленные предприятия таких отраслей, как приборостроение, НИИ с собственным производством (легкое машиностроение и т.д.), такие как НИИ Градиент и другие, точно расположенные объекты, в основном, располагаются в структуре города в непосредственной близости от селитьбы.

- на периферии;

При осуществлении проектирования полифункциональных градостроительных объектов, включающих в себя и селитебную, и промышлен-

ную, и иные функциональные зоны, производственные предприятия часто размещаются на периферии градостроительной структуры и вблизи транспортных узлов. (ГПЗ10), большинство восстанавливаемых промышленных объектов ДНР,

ЛНР расположены также расположены на периферии и относятся к отраслям обрабатывающей промышленности, таким, как изготовление ЖБК и других строительных конструкций.

– за пределами города.

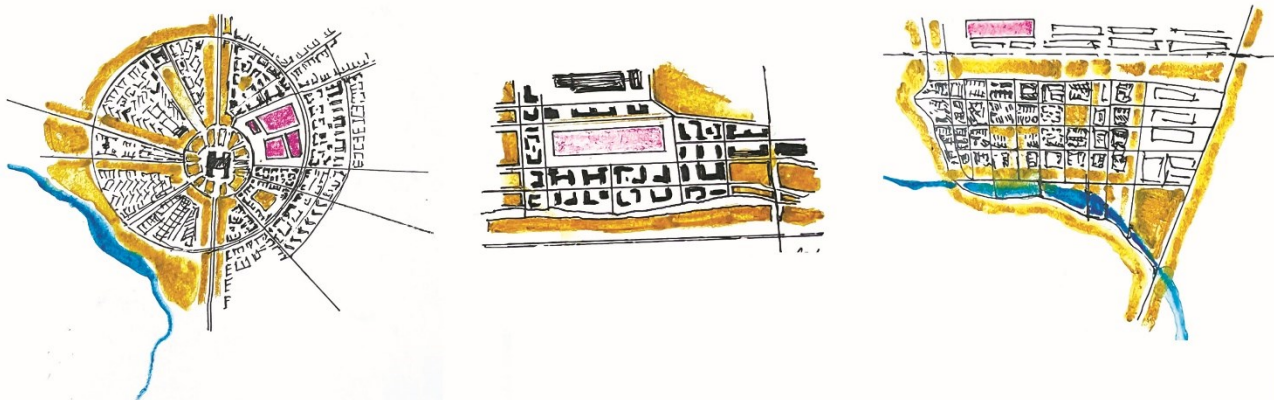


Рис. 1 Классификация восстанавливаемых промышленных объектов по расположению относительно структуры города:

а) в структуре города, вблизи селитебной зоны; б) на периферии; в) за пределами города

При формировании эстетического вхождения восстанавливаемого промышленного объекта на уровне города необходимо учитывать его расположение в структуре города и характер окружающей застройки, таким образом, применяется принципиально разный подход при дислокации объекта в визуальной связи с эстетически и исторически ценной застройкой и при расположении его в монотонной композиции периферийной застройки [21–25].

Одним из осложнений при реконструкции восстанавливаемого промышленного объекта советского периода, расположенного в структуре эстетически и исторически ценной застройки, является как правило, высокий показатель плотности этой застройки, композиционная несогласованность восстанавливаемого объекта с этой застройкой в силу его габаритов (протяженности, усиленного горизонтального объема), стилистически бедного оформления фасадов и ограждений. Визуально доминирующий объем производственного объекта создает разрыв в структуре городской ткани. Эстетический контекст восприятия промышленного объекта в структуре окружающей застройки становится все более важным при формировании целостного образа градостроительного образования. Соответственно, необходимо «погасить» давящий эффект производственного объекта и создать целостную визуальную картину структуры, существующей эстетически и исторически ценной застройки [25–29].

Визуально-эстетический компонент т.н. спальных районов, характеризующийся своей композиционной монотонностью, существенно снижает уровень качества жизни современного

города. Обезличенный характер строчной жилой застройки, перемежающийся со вкраплениями озелененных участков инфраструктуры обслуживания (скверов, парков и т.п.), а также существующих промышленных объектов советского периода, нуждается в коррекции. При этом, в качестве композиционной доминанты рационально принять восстанавливаемый производственный объект ввиду его габаритных показателей, цветовых, структурных характеристик фасадов зданий и ограждений. Поскольку как правило, фасады таких зданий также имеют монотонную структуру с ярко выраженной горизонтальностью масс объемов зданий, особенно при наличии ленточного остекления верхних уровней (этажей) этих зданий, рационально при помощи основных и дополнительных композиционных средств купировать эффект протяженности за счет ввода вертикальных членений посредством либо внедрения дополнительных объемных элементов на фасадах и ограждениях (функциональных и декоративных), либо за счет таких средств, как формирование образа фасада при помощи цвета (нанесение плоскостного изображения) – такой способ может стать наиболее экономически целесообразным, а также быстрым в реализации [30–34].

Б) По наличию буферных зон, внешних путей железнодорожного транспорта (рис. 2):

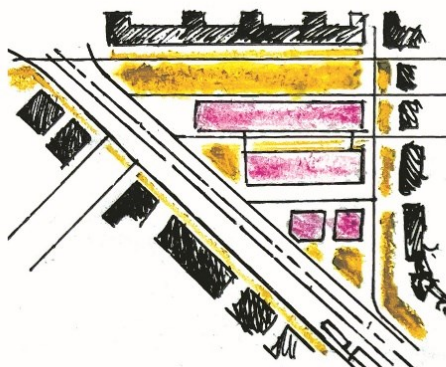
– объекты, включающие буферные зоны;

В структуре крупных промышленных узлов ввиду их отраслевой принадлежности, как правило, закладываются буферные зоны. (Красный котельщик, Азовсталь)

– предприятия, не имеющие буферных зон (Градиент, НИИРС);

– предприятия, имеющие внешние железнодорожные пути (Азовсталь; Ростсельмаш, Красный котельщик).

Крупные промышленные предприятия советского периода часто оснащены сетью внутренних и внешних путей транспорта, в т.ч. путей железнодорожного транспорта: а) функционирующие; б) частично функционирующие; в) нефункционирующие.



– предприятия, не имеющие внутренних и внешних путей железнодорожного транспорта;
– предприятия, находящиеся вблизи прирельсовых территорий (Ростсельмаш);
– предприятия, расположенные вне границы влияния прирельсовых территорий.

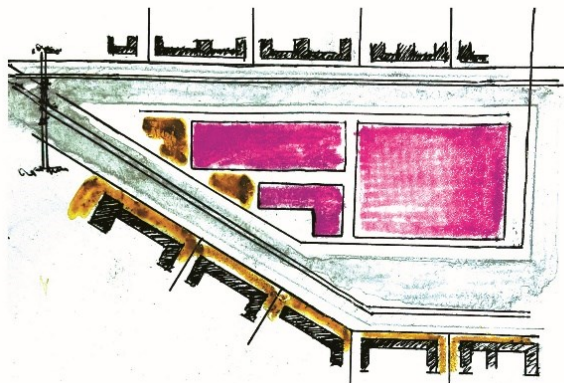


Рис. 2. Классификация восстанавливаемых промышленных объектов по наличию буферных зон, внешних путей железнодорожного транспорта:

а) предприятия, не имеющие буферных зон; б) объекты, включающие буферные зоны и внешние пути железнодорожного транспорта

Как правило, крупные промышленные узлы оснащены буферными зонами и внешними путями железнодорожного транспорта, имеющими, соответственно прирельсовые территории, не оборудованные системой благоустройства и не обеспеченные безопасными переходами. При наличии таких зон необходимо обеспечить безопасные подземные и надземные планировочные пешеходные переходы, а также зеленый экран по всей протяженности существующих путей железнодорожного транспорта. Буферные зоны и неэксплуатируемые пути железнодорожного транспорта рационально расширение внутренней системы благоустройства и озеленения реконструируемого промышленного объекта во вне с учетом градостроительных особенностей участка и прилегающей застройки – так обеспечивается жесткость и единство экологического каркаса восстанавливаемого предприятия в структуре окружающей застройки. Таким образом происходит визуальное слияние объекта с застройкой и формируется экосистема рассматриваемой территории. Зоны скверов, парков, соединенных бульварами, отделенные от промышленного предприятия зеленым экраном придадут эстетическую ценность территории [35–38]. При монотонном композиционном характере застройки периферии необходимо отметить актуальность расширения системы благоустройства и озеленения в сторону восстанавливаемых промышлен-

ных объектов в контексте визуально-эстетической увязки этих объектов с окружающей застройкой, но как генерацию единой сети объектов озеленения или экологического каркаса территории, включая крупный градообразующий объект – восстанавливаемое промышленное предприятие советского периода, обновляющееся, опережая растущие требования по устойчивости производственной среды в аспекте улучшения качества жизни в современном городе. Таким образом на основе экологического каркаса восстанавливаемого предприятия, соединенного с системой зеленых насаждений в структуре территории, образуется единый поликомпонентный живой организм [39–41].

Рассматриваемые в исследовании существующие предприятия советского периода классифицируются по своей структуре на концептуальные модели (рис. 3):

– *локальные объекты*. Предприятия, размещенные в структуре города, обычно в пределах одного или нескольких зданий, на ограниченной территории, вблизи селитебной зоны. Как правило, без буферных зон и СЗЗ, соответственно. Локальные объекты могут иметь различную отраслевую направленность, с существующей СЗЗ не более 100м, как, к примеру, предприятия отрасли приборостроения (РНИИРС, Градиент). Такого рода объекты-точки в структуре плотной застройки являются композиционными акцен-

тами, поскольку преобладают по этажности относительно окружающей застройки. Следовательно, при формировании решения их реконструкции требуется на основании комплексного исторического, архитектурного, композиционно-колористического анализа окружающей застройки выбрать модель художественно-эстетической трансформации этих «точек» в структуру окружающей застройки.

– *комплексные объекты.* Предприятия, осуществляющие производственную деятельность полного цикла, занимают большую территорию, размещены в структуре города, вблизи крупных транспортных узлов, часто граничат с селитьбой, в таких случаях наблюдаются буферные зоны и СЗЗ, не более 500м. Комплексные объекты, расположенные, как правило, изначально на периферии, с течением урбанизационного процесса оказались зажаты в плотную структуру общественной и селитебной застройки. Таким образом, крупногабаритный объект находящийся, помещенный в структуру периферийной застройки, имеющей монотонный характер, с одной стороны обладает давящим эффектом, но с другой – обладает потенциал для осуществления функций эстетически ценной композиционной доминанты при обоснованном формировании решения реконструкции его облика. Однако встречаются предприятия раннего советского периода, градообразующие, обросшие селитьбой и инфраструктурой обслуживания, представляющей эстетическую и историческую ценность как объекты-произведения архитектуры сталинской эпохи.

– *промышленные парки.* Объекты градообразующие, имеющие протяженную территорию, застроенную полноценную инфраструктуру социально-бытового обслуживания, в ряде случаев наблюдаются буферные зоны, СЗЗ более 500м, селитебная застройка в пешей доступности, либо без нее, на периферии или за чертой города. При учете ускорения динамики урбанизационного процесса и стремительного расширения границ города, ведущий к постепенному поглощению территорий и слиянию городских формирований, те объекты, которые изначально были сформированы на периферии, на границе города или же за пределами города, начинают обрастать городской тканью и в итоге плотно вписываются в каркас нового формирования. Здесь опять же встает вопрос эстетической корреляции промышленного объекта. Более того, ситуация осложняется большой протяженностью промышленного парка. При том, что периферийная и вновь возводимая современная селитебная застройка значительно превалирует по этажности относительно любого промышленного парка, стоит отметить, что за счет своей протяженности и монотонного характера существующей композиционной структуры фасадов и ограждений, восстанавливаемый объект модели промышленный парк существенно влияет на эстетику городской среды в негативном ключе, создавая эффект подавленности и таким образом заметно снижает уровень качества жизни в современном городе.

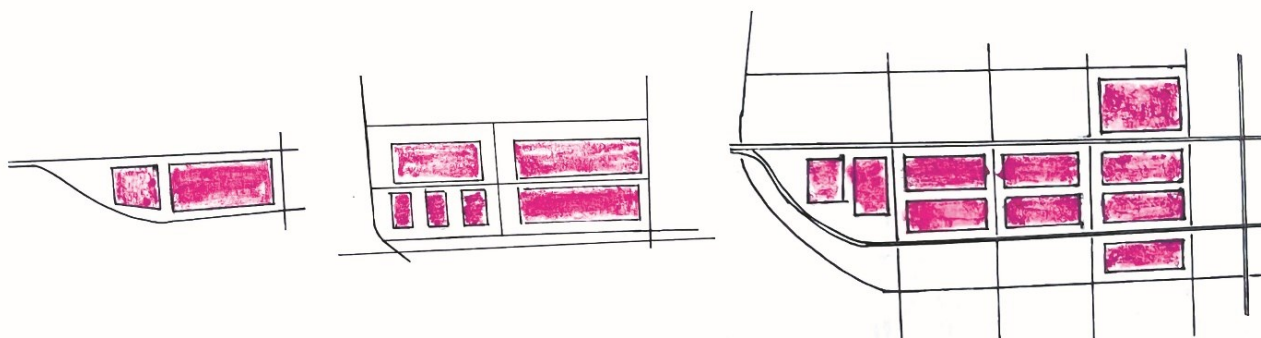


Рис. 3 концептуальные модели восстанавливаемых объектов по структуре:
а) локальная модель; б) комплексная модель; в) промышленный парк

Эстетика вхождения восстанавливаемого промышленного объекта советского периода, как правило, формируется при помощи отделки фасадов производственных зданий фасадными системами с использованием дополнительных композиционных средств, таких, как фактура и цвет. При этом в ряде случаев, цветовое решение фасада и ограждения таких предприятий выбирается, исходя из т.н. цветов фирменного стиля предприятия. Скажем так – не всегда восстанавливаемые объекты сохраняют первоначальный

бренд, более того, отраслевая направленность предприятия может быть расширена (как происходит с крупными промышленными предприятиями на юге России, начиная с 2014 г., и эта динамика только растет, пребывая на пике с 2022 г.), а также может измениться. Соответственно, возникает вопрос целесообразности глобального применения фирменного цвета при формировании внешнего облика реконструируемого промышленного объекта в контексте его эстетической корреляции с окружающей застройкой. Тем

не менее, используется также и т.н. отсутствие цвета – т.е. отделка фасадов системами с выбором цветового решения в сторону оттенков ахроматической гаммы, отсутствием контрастных элементов, проявляющихся как композиционные средства, ведущие к эстетически ценному результату. Как правило, такие решения ведут к появлению или по факту – обновлению восстанавливаемого промышленного объекта советского периода, однако без улучшения его художественно-эстетических характеристик. Иначе говоря, серые коробки, прикрытые огромной по протяженности, такой же серой безликой лентой ограждения, обросшей строчной застройкой, визуальнo хаотично перемежающейся с точками «свечек» и вкраплениями новых жилых комплексов, формируют и бессвязный, и монотонный, и бесструктурный урбанизированный участок, лишенный эстетической целостности, что является недопустимым в отношении соответствия требованиям к среде современного города.

При формировании художественно-эстетического образа восстанавливаемого промышленного объекта в структуре городской застройки может быть использовано 2 принципиальных модели.

1) При вхождении восстанавливаемого производственного объекта советского периода в эстетически- или исторически- ценную среду рационально применить *мимикрирующую модель* (рис. 4, 6). Она подразумевает визуальное «исчезновение» изначально крупного объема здания или комплекса зданий, являющихся доминантой в силу своих габаритов, нередко оказывающих гнетущее воздействие на восприятие глазом. Производственное включение в существующую застройку, особенно исторически сложившегося характера является разрушительным. Целостность городской ткани разрывается. Мимикрирующая модель позволит сгладить эффект монументальности и габаритный контраст, создающийся между промышленным объемом и окружающей застройкой, а также реализовать архитектурные приемы, способствующие повышению экологичности городской среды. При том, мимикрирующая модель одинаково успешно реализуется, как на локальных объектах, так и на комплексных, и при формировании эстетического решения вхождения в окружающую застройку промышленного парка. При увеличении габаритов реконструируемого объекта, пропорционально внедряются зеленые насаждения в виде оформления ограждений, скверов, парков, бульваров (на территории буферных зон и при освоении внешних прирельсовых территорий. Архитектурные средства, применяемые при использовании мимикрирующей модели:

– навесные фасадные системы с отражающим покрытием, создающие эффект продолжения существующей застройки, визуальнo повторяясь в зеркальных фасадах восстанавливаемых объектов;

– использование выходящих зеленых насаждений на фасадах и ограждениях восстанавливаемых промышленных объектов, находящихся в структуре плотной застройки – это позволит повысить как эстетические качества производственного объекта, так и показатели устойчивости, поскольку организация зеленых насаждений снижает уровень вредных выбросов промышленных предприятий. Комплексное использование зеленых насаждений при формировании решения реконструкции восстанавливаемых промышленных объектов советского периода, с учетом протяженности таких объектов, может существенно повлиять на визуально-эстетические и экологические показатели городской среды, а значит и на качество жизни в современном городе.

– устройство зеленых зон ((общественных парков и скверов) на территориях бывших буферных зон и при заводских территориях).

2. *Акцентная модель* (рис. 5, 6). Такая модель эстетического вхождения восстанавливаемого объекта в структуру существующей застройки оптимальна при монотонном характере этой застройки, при отсутствии эстетически- и исторически-ценной городской среды, которую следовало бы уберечь от пагубного влияния больших габаритов промышленного объекта [39, 40]. Акцентная модель предполагает индивидуальный подход к формированию реконструируемого объекта с применением основных и дополнительных средств архитектурной композиции (формирование ценных композиционных характеристик восстанавливаемого объекта (формы, колорита, общей визуальной концепции (тип композиции, концептуально-философская основа формообразования), прежде всего, с опорой на устойчивость, т.е. с применением технологий, снижающих углеродный след при осуществлении производственной деятельности, максимизацию автономности при потреблении природных ресурсов в осуществлении производственных и вспомогательных процессов на объекте; устройство внешней системы зеленых насаждений для осуществления работы зеленого каркаса реконструируемого предприятия за его физическими пределами (в т.ч. в качестве композиционной связки с окружающей застройкой). Суть в том, что акцентирование крупногабаритного промышленного объема в структуре окружающей застройки также должно соответствовать требованиям эстетической корреляции, т.е.: а) быть деликатным в отношении колористической

модели в контексте вхождения в общий колорит существующей застройки, но при этом иметь читаемую индивидуальность; б) иметь схожие габаритные параметры компонентов-средств композиционной выразительности, используемых при формировании облика фасадов и ограждений восстанавливаемого промышленного объекта советского периода с габаритами компонентов композиции окружающей застройки; в) обладать яс-

ным, обоснованным концептуальным фундаментом, четко читаемым в реализуемом композиционном решении художественно-эстетического формирования восстанавливаемого объекта. Также ценным вариантом концептуальной основы для формирования художественно-эстетического облика восстанавливаемого объекта может служить «миф места» или историко-географические характеристики территории, их особенности.



Рис. 4. Мимикрирующая модель эстетического вхождения восстанавливаемого промышленного объекта советского периода:

- а) на примере комплексного объекта (включая промышленный парк);
- б) на примере локальной модели промышленного объекта

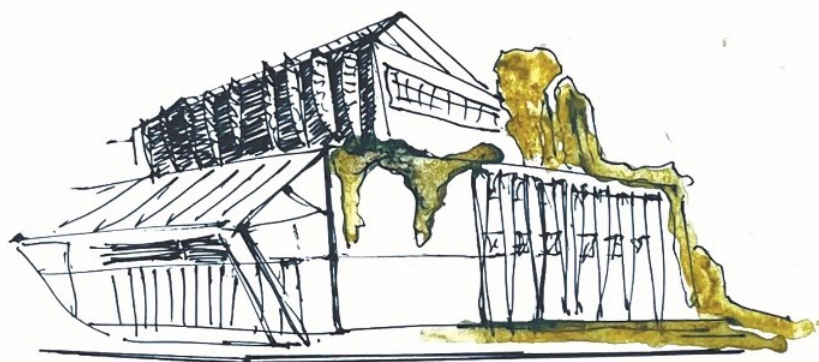


Рис. 5. Акцентная модель эстетического вхождения восстанавливаемого промышленного объекта советского периода:
а) на примере комплексного объекта (включая промышленный парк); б) на примере локальной модели промышленного объекта.

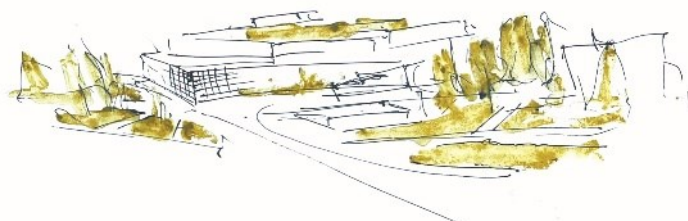


Рис. 6. Варианты восстановления буферных зон и прирельсовых территорий восстанавливаемых промышленных объектов

При том, что динамика роста застройки периферии городов достаточно высока, и при формировании новых селитебных районов затрагиваются, и впоследствии, обволакиваются ими, существующие производственные предприятия, ввод ярких, идейно- и эстетически- насыщенных крупногабаритных объектов в структуру монотонной застройки может стать основой обновленной городской среды, сформированной при помощи образной концепции восстанавливаемого промышленного объема, развивающего во вне свой экологический каркас и распространяющий свою эстетическую и гуманистическую индивидуальность в городскую ткань периферии.

Выводы. В ходе исследования восстанавливаемые объекты классифицированы по следующим показателям:

- по расположению на уровне структуры города;
- по наличию буферных зон;
- по наличию существующих внешних путей железнодорожного транспорта.

Выявлено 3 концептуальных модели восстанавливаемых промышленных объектов советского периода в контексте их структуры.

Выведено 2 принципиальных модели эстетического вхождения восстанавливаемых промышленных объектов в структуру окружающей застройки, работающих на всех типах промышленных объектов (на локальном, комплексном типе, а также промышленном парке):

- -мимикрирующая модель, заставляющая промышленный объект визуально «исчезать», отражая объекты окружающей застройки, перемежающиеся с зонами формируемых вновь зеленых насаждений (реализуется при расположении реконструируемого промышленного предприятия в эстетически- и исторически- ценной среде городского каркаса;

- -акцентная модель, при использовании которой формируется уникальный эстетически объект, являющийся композиционной доминантой в структуре окружающей застройки.

Такой подход оптимален для периферии с монотонным характером застройки. С учетом того факта, что вновь возводимые жилые комплексы часто имеют акцентное колористическое решение с множеством мелкогабаритных компонентов, с ориентацией на вертикальность общей композиции таких объектов, существующие промышленные предприятия советского периода, представляющие собой, как правило, внушительный, в разы превышающий габаритами, горизонтальный объем, который ничем не сдерживаемый, ежедневно давит на зрителя своей массой.

Скорость урбанизации настолько возросла за последнее десятилетие, что прогнозирование

градостроительного развития территорий только сейчас приобретает реальный характер за счет исследования градостроительных и архитектурно-конструктивных показателей вновь возводимой селитебной застройки и инфраструктуры ее обслуживания.

Картина складывается следующая. Рост ко-нурбации, сращение отдельных территориальных образований, поглощение крупными более мелких за счет застройки повышенной этажности, крайне «разнообразной» по цветовому решению, создает определенный дисбаланс, который возможно устранить при помощи организации крупной композиционной доминанты или напротив – объект, подчеркивающий эстетическую и историческую ценность окружающей застройки.

Практически для каждого из подобных участков городских территорий (или вновь присоединенных городских территорий) существует, благодаря высокой производственной активности советского государства и обеспечения территорий промышленными объектами, производственное предприятие, в той или иной степени подлежащее восстановлению. Это может быть как локальный объект-точка, собирающий вокруг себя окружающую застройку, как ядро, к которому ведут пути, сформированные из распространившегося вовне экологического каркаса реконструируемого предприятия, так и более крупное формирование, захватывающее и соединяющее в прошлом различные по структуре и сути территории общей тканью.

Таким образом, качество жизни в современных городах ухудшается не только за счет понижения уровня экологической безопасности окружающей среды урбанизированных структур в целом (в силу усугубления проблемы переполненности дорожно-транспортной сети и т.п.), но также и за счет влияния других компонентов среды, таких, как отсутствие планировочной целостности срачивающихся территорий (что ведет за собой и отсутствие единого экологического каркаса вновь образованной ткани), отсутствие визуально-эстетического единства современных урбанизированных структур (прежде всего в силу концептуальной рассогласованности отдельных элементов застройки районов, что мотивировано маркетинговыми стратегиями застройщиков).

Восстанавливаемое производственное предприятие советского периода, реконструированное в соответствии с обновляющимися технологическими, экологическими, социально-психологическими и художественно-эстетическими требованиями, способно являть собой своего рода композиционный центр для периферийных

структур при ярком, но деликатном, рациональном, художественно-эстетически и планировочно обоснованном решении, основанном на комплексном архитектурном и историческом анализе территории и существующей застройки с применением акцентной модели для его разработки. Промышленное предприятие же, расположенное в структуре исторически и эстетически ценной застройки, визуально подчиняясь ей (при использовании мимикрирующей модели), сохраняет свою индивидуальность за счет использования элементов фирменного стиля предприятия или ряда резидентов комплекса в качестве композиционных средств, обильного ввода зеленых насаждений на фасаде, ограждениях, создании системы благоустройства и озеленения, визуально связывающей восстанавливаемый промышленный объект с окружающей застройкой.

В целом, проблема увязки вновь образующихся урбанизированных структур, находящихся в постоянной «маркетинговой гонке», и существующих объектов советской архитектуры, в частности-промышленной, только растет. Интересно и то, что предлагаемые т.н. «европо-направленные» образцы вновь возводимых жилых комплексов, вроде как с претензией на «устойчивость», имеют ряд серьезных проблем как раз в отношении той же устойчивости, не говоря уже о вещах, связанных с влиянием (в том числе визуально-эстетическим) на существующую застройку. В то время, как восстанавливаемый промышленный объект советского периода для того, чтобы осуществлять производственную деятельность, действительно обновляется и становится более экологически безопасным в силу таких обстоятельств, как контроль углеродного следа и пр. Тем не менее, проблема визуально-эстетической компоненты производств остается нерешенной вследствие отсутствия комплексного подхода к ее решению. Предлагаемые принципиальные модели эстетического вхождения таких объектов в структуру окружающей застройки являют собой новый подход к формированию целостных урбанизированных территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sandstrom U. Green Infrastructure Planning in Urban Sweden // *Planning Practice and Research*. 2002. Vol. 17. 4. Pp. 373–385. DOI:10.1080/02697450216356
2. Moioli R., Baldioli A., Teoria, norme e iniziative esemplari // *Conoscere per conservare*. 10 anni per la Conservazione Programmata, Quaderni dell'Osservatorio. 2018. Vol. 29. Pp. 7–18.
3. Nilsson K., Nielsen T.S., Pauleit, S., Ravetz J. A PLUREL approach to peri-urban areas // *Town & Country Planning*. 2008. Pp. 519–524.
4. Van der Ploeg, J.D., Long, A. Born from Within. Practice and Perspectives of Endogenous Rural Development. Van Gorcum and Comp BV Assen, 1994. 298 p.
5. Vos W., Meekes, H. Trends in European cultural landscape development: perspectives for a sustainable future // *Landscape and Urban Planning* 1999. Vol. 46. Pp. 3–14. DOI:10.1016/S0169-2046(99)00043-2
6. Kovacs, B., Mathijs, E., Brunori, G., Carus, M., Griffon, M., Last, L., Gill, M., Koljonen, T., Lehoczy, E., Olesen, I., Potthast, A. Agriculture. The Scientific Basis for Sustainable Multiple-Use Forestry in the European Community // *Proceedings of a Scientific Workshop under the Community research programme on Agriculture and Agro-industry, including Fisheries (Air)*. Brussels, Belgium. 2015. pp. 28-29. DOI:10.2777/179843
7. Taylor K. A charter for all seasons: the Burra Charter in an Asia-Pacific context // *Historic Environment*. 2004. Vol. 16.1. Pp. 46–49.
8. Shi Pu. Knowledge based building facade reconstruction from laser point clouds and images. *Geodesy 75 NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission*. Delft, 2010. 133 p.
9. Slavković B.P. Application of the double skin façade in rehabilitation of the industrial buildings in Serbia. State University of Novi Pazar. Novi Pazar, Serbia. 2016. 12 p.
10. Brown J., Kothari A. Traditional agricultural landscapes and community conserved areas: an overview // *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 2011. Vol.22(2). Pp. 139–153. DOI:10.1108/14777831111113347
11. Jones R., Shaw B.J. Palimpsests of Progress: Erasing the Past and Rewriting the Future in Developing Societies—Case Studies of Singapore and Jakarta // *International Journal of Heritage Studies*. 2006. Vol. 12(2). Pp. 122–138. DOI:10.1080/13527250500496045
12. Melnick R.Z. Climate Change and Landscape Preservation: A Twenty-First-Century Conundrum // *APT Bulletin: Journal of Preservation Technology*. 2009. Vol. 40. Pp. 35–42.
13. Jones E. Industrial architecture in Britain: 1750–1939. NY: Facts on File. 1985. 239 p. DOI:10.1017/S0003581500028857
14. Цитман Т.О., Богатырева А.В. Реновация промышленной территории в структуре городской среды / Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал // Астраханский инженерно-строительный институт. Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2015. №4 (14). С. 29–35.
15. Baldinelli G. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with

anintegrated movable shading system // Building and Environment. 2009. Vol. 44. Pp. 1107–1118

16. Морозова Е. Б. Современные тенденции развития промышленной архитектуры // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2007. № 1. С. 5–10.

17. Гуссерль Э. Кризис европейских наук и трансцендентальная феноменология. СПб.: ВладимирДаль: Фонд «Университет», 2004. 398 с.

18. Штиглиц М.С. Промышленная архитектура Петербурга в сфере «индустриальной археологии». СПб.: Белое и черное, 2003. 221 с.

Андреева Ю.В. Реновация промышленно-производственных территорий в структуре южных городов (Ростова-на-Дону, Волгограда, Астрахани) // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. №3(64). С. 196–212.

20. Bradley B.H. The Works: the industrial architecture of the United States. B.H. Bradley. NY. Oxford. Oxford University Press, 1999. p. 347

21. Henn W. Optical environment protection - the task and duty of the architect. W. Henn II Aspects on industrial architecture and engineering: col. Papers. international Council for Building Research, Studies and Documentation; International Union of Architects // Helsinki: The Building Book Ltd. 1989. Pp. 25–27.

22. Асаул А.Н., Казаков Ю.Н., Ипанов В.И. Реконструкция и реставрация объектов недвижимости: учебник [Электронный ресурс]. СПб.: Гуманистика, 2005. – 288 стр. Режим доступа: http://www.aup.ru/books/m495/2_1_1.htm (дата обращения: 05.03.2024)

23. Брендоусова Е.К. Методы сохранения архитектурных традиций при реновации зданий и сооружений // Баландинские чтения. 2020. Т. 15. С. 16–22. DOI 10.24411/9999-001A-2020-10002.

24. Van Oudenhoven F.J.W., Mijatovic D., Eyzaguirre P.B. Social-ecological indicators of resilience in agrarian and natural landscapes. Management of Environmental Quality: An International Journal. 2011. Vol. 22.2. Pp. 154–173. Рифкин Д. Третья промышленная революция: как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом. М. : АНФ, 2014. 239 с.

26. Ashworth G.J. From History to Heritage - From Heritage to Identity. Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham. Building a New Heritage. Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York. 1994. pp. 13 – 30.

27. Pedrosa F., Marques B., Pedrosa A. Notas e

Recensões // IV Colóquio Ibérico de Geografia. In revista da Faculdade de Letra Geografia. Porto. 1998. Vol. 4. 31.

28. Fortuna C. Destradicionalização e imagem da cidade – o caso de Évora // Carlo. Cidade, Cultura e Globalização. Celta. 1997. Pp. 231–257.

29. Ashworth G.J. From History to Heritage - From Heritage to Identity. In: Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham Building a New Heritage // Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York. 1994. Pp. 13–30.

30. Lootsma B. Biomorp Landscape Urbanism // Topos. 2002. Vol. 40. Pp. 10–25.

31. Latz P. Duisburg North Landscape Park // Anthos. 1992. Issue 3. Pp. 27–32.

32. Corner J. Terra Fluxus // The Landscape Urbanism Reader. New York: Princeton Architectural Press. 2006. Pp. 21–33.

33. Румянцева А.В., Самойлов Е.К., Березюк М.В., Пластинина Ю.В. Реновация объектов индустриального наследия: эколого-экономические аспекты // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Том 13. № 6. С. 1983–1996. DOI:10.18334/epp.13.6.117775

34. Louvi A. Viable and compatible uses in old factories. Poria. Athens, Greece. 2007. 299 p.

35. Abalos, I. Recycling Madrid: Abalos and Herreros, Actar, Barcelona. ES. 2001. 26 p.

36. Weilacher U. Syntax of Landscape: The Landscape Architecture by Peter Latz and Partners. Basel Berlin Boston: Birkhauser Publisher. 2008. p. 105

37. Шеин В.В. Направления трансформации реконструируемых промышленных зданий на примере объектов Южного федерального округа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №9. С. 62–67.

38. Грахов В.П., Мохначев С.А., Манохин П.Е., Виноградов Д.С. Основные тенденции современных проектов реновации промышленных зон // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 400–404.

Назаренко В.В., Суша Г.З. Оценка конкурентоспособности продукции и предприятия как основа планирования его деятельности // Вестник Белорусского национального технического университета : научно-технический журнал. 2006. № 1. С. 67–73.

40. Allen T.J. The Organization and Architecture of Innovation. Managing the Flow of Technology. Amsterdam, Tokyo: Elsevier. 2007. 136 p.

41. Palang H., Soini K., Printsmann A., Birkeland I. Landscape and cultural sustainability // Norsk Geografisk Tidsskrift. Norwegian Journal of Geography. 2017. Vol. 71. 3. Pp. 127–131. DOI:

10.1080/00291951.2017.1343381

Информация об авторах

Шейн Валерия Вячеславовна, старший преподаватель кафедры градостроительство и проектирование зданий.
E-mail: va_in@list.ru. Донской государственный технический университет. Россия, 344003, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Поступила 26.04.2024 г.

© Шейн В.В., 2024

Shein V.V.

Don State Technical University

E-mail: va_in@list.ru

AESTHETICAL MODELS OF INCLUSION RECOVERED INDUSTRIAL OBJECTS INTO EXSISTING URBAN STRUCTURE

Abstract. *The article presents models of aesthetic formation of reconstructed industrial objects of the Soviet period in the surrounding development in the context of sustainability at the level of the city structure, taking into account the growth of the urban fabric. The industrial enterprises in question, as a rule, initially located on the outskirts of the city. Due to the dynamics of urbanization processes, they have become tightly integrated into the urban fabric, and are currently so-called exclusion zones, since they are large-sized relative to the surrounding development objects, including residential buildings and elements of the infrastructure of its social and domestic services. It is also necessary to note the enterprises that are city-forming and located in the structure of the historical center of the urban settlement, where it is especially important to preserve the authenticity of the historical development: to introduce reconstructed industrial facilities as delicately as possible (to select the aesthetic model of the reconstructed enterprise) into the historically established visual and aesthetic code of the city. Thus, two models of aesthetic inclusion of existing industrial enterprises being restored into the city structure have been identified: mimicry, related to objects located in the historical part of the city, and accentual – forming a visual center of attraction outside the historical part of the city, on the periphery and outside the city. The article also examines options for aesthetic inclusion of industrial objects being reconstructed depending on their urban development features: the presence of buffer zones and sanitary protection zones, the presence of external railway routes adjacent to the objects.*

Keywords: *industrial buildings, conceptual models of industrial facilities, reconstruction of industrial buildings, industrial architecture, aesthetics of the industrial objects.*

REFERENCES

1. Sandstrom U. Green Infrastructure Planning in Urban Sweden. Planning Practice and Research. 2002. Vol. 17. 4. Pp. 373–385. DOI:10.1080/02697450216356
2. Moioli R., Baldioli A., Teoria, norme e iniziative esemplari. Conoscere per conservare. 10 anni per la Conservazione Programmata, Quaderni dell'Osservatorio. 2018. Vol. 29. Pp. 7–18.
3. Nilsson K., Nielsen T.S., Pauleit, S., Ravetz J. A PLUREL approach to peri-urban areas. Town & Country Planning. 2008. Pp. 519–524.
4. Van der Ploeg J.D., Long A. Born from Within. Practice and Perspectives of Endogenous Rural Development. Van Gorcum and Comp BV Assen, 1994. 298 p.
5. Vos W., Meekes H. Trends in European cultural landscape development: perspectives for a sustainable future. Landscape and Urban Planning 1999. Vol. 46. Pp. 3–14. DOI:10.1016/S0169-2046(99)00043-2
6. Kovacs B., Mathijs E., Brunori G., Carus M., Griffon M., Last L., Gill M., Koljonen T., Lehoczyk É., Olesen I., Potthast A. Agriculture. The Scientific Basis for Sustainable Multiple-Use Forestry in the European Community. Proceedings of a Scientific Workshop under the Community research programme on Agriculture and Agro-industry, including Fisheries (Air). Brussels, Belgium. 2015. Pp. 28–29. DOI:10.2777/179843
7. Taylor K. A charter for all seasons: the Burra Charter in an Asia-Pacific context. Historic Environment. 2004. Vol.16.1. Pp. 46–49.
8. Pu S. Knowledge based building facade reconstruction from laser point clouds and images. Geodesy 75 NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission. Delft. March 2010. 133 p.
9. Slavković B.P. Application of the double skin façade in rehabilitation of the industrial buildings in Serbia. State University of Novi Pazar. Novi Pazar, Serbia. 2016. 12 p.

10. Brown J., Kothari A. Traditional agricultural landscapes and community conserved areas: an overview. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 2011. Vol. 22(2). Pp. 139–153. DOI:10.1108/14777831111113347
11. Jones R., Shaw B. J. Palimpsests of Progress: Erasing the Past and Rewriting the Future in Developing Societies—Case Studies of Singapore and Jakarta. *International Journal of Heritage Studies*. 2006. Vol. 12(2). Pp. 122–138. DOI:10.1080/13527250500496045
12. Melnick R.Z. Climate Change and Landscape Preservation: A Twenty-First-Century Conundrum. *APT Bulletin: Journal of Preservation Technology*. 2009. Vol. 40. Pp. 35–42.
13. Jones E. Industrial architecture in Britain: 1750–1939. NY: Facts on File. 1985. 239 p. DOI:10.1017/S0003581500028857T.
14. Tsitman O., Bogatyreva A.V. Renovation of industrial areas in the structure of the urban environment [Renovaciya promy'shlennoj territorii v strukture gorodskoj sredy] Astrakhan Institute of Civil Engineering. 2014. No. 4 (14). Pp. 29–35. (rus)
15. Baldinelli G. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Pp. 1107–1118
16. Morozova E.B. Contemporary tendencies of development of industrial architecture [Sovremennyye tendencii razvitiya promy'shlennoj arhitektury]. *Bulletin of Belorussian national technical university: scientific-technical journal*. 2007. No. 1. Pp. 5–10
17. Gusserl' E'. The crisis of European sciences and transcendental phenomenology [Krizis evropejskix nauk i transcendental'naya fenomenologiya E'. Gusserl']. per. D. V. Sklyadneva. – SPb.: VladimirDal': Fond «Universitet», 2004. 398 pp. (rus)
18. Stieglitz M.S. Industrial architecture of St. Petersburg in the field of “industrial archaeology” [Promy'shlennaya arhitektura Peterburga v sfere «industrial'noj arxeologii». SPb.: White and black, 2003. 221 p. (rus)
19. Andreeva J.V. The renovation of industrial and production areas in the structure of southern cities (Rostov-on-Don, Volgograd, Astrakhan) [Renovaciya promy'shlenno-proizvodstvenny'x territorij v strukture yuzhny'x gorodov (Rostova-na-Donu, Volgograda, Astraxani)]. *Architecture and Modern Information* 1, 2023 197 AMIT 3(64) 2023 Technologies. 2023. No. 3(64). Pp. 196–212. (rus)
20. Bradley B.H. The Works: the industrial architecture of the United States. B.H. Bradley. NY. Oxford. Oxford University Press, 1999. 347 p.
21. Henn W. Optical environment protection - the task and duty of the architect. W. Henn II Aspects on industrial architecture and engineering: col. Papers. international Council for Building Research, Studies and Documentation; International Union of Architects. Helsinki: The Building Book Ltd. 1989. Pp. 25–27.
22. Asaul A.N., Kazakov Yu.N., Ipanov V.I. Reconstruction and restoration of real estate objects. [Rekonstrukciya i restavraciya ob`ektov nedvizhimosti: uchebnik]. SPb.: Gumanistika, 2005. 288 p. Rezhim dostupa: http://www.aup.ru/books/m495/2_1_1.htm (data obrashheniya: 05.03.2024) (rus)
23. Brendousova E.K. Methods of preserving architectural traditions during the renovation of buildings and structures [Metody soxraneniya arxitekturny'x tradicij pri renovacii zdaniy i sooruzhenij. Balandinskie chteniya]. 2020. Vol. 15. Pp. 16–22. DOI: 10.24411/9999-001A-2020-10002. (rus)
24. Van Oudenhoven F.J.W., Mijatovic D., Eyzaguirre P.B. Social-ecological indicators of resilience in agrarian and natural landscapes. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 2011. Vol. 22.2. Pp. 154–173.
25. Rifkin D. The third industrial revolution: how horizontal interactions are changing energy, the economy and the world as a whole [Tret'ya promy'shlennaya revolyuciya: kak gorizontally'e vzaimodejstviya menyayut e'nergetiku, e'konomiku i mir v celom] Dzheremi Rifkin. per. s angl. V. Ionov. M.: ANF, 2014. 239 p. (rus)
26. Ashworth G.J. From History to Heritage - From Heritage to Identity. In: Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham [orgs.], Building a New Heritage. Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York, 1994. Pp. 13–30.
27. Pedrosa F., Marques B., Pedrosa A. Notas e Recensões. IV Colóquio Ibérico de Geografia. In revista da Faculdade de Letra Geografia. Porto. 1998. Vol. 4. Pp. 301–331.
28. Fortuna C. Destradicionalização e imagem da cidade – o caso de Évora. In: Carlo. Cidade, Cultura e Globalização. Celta. 1997. Pp. 231–257.
29. Ashworth G. J. From History to Heritage - From Heritage to Identity Search Concepts and Models. Greg Ashworth e P. Larkham Building a New Heritage. Tourism, Culture and Identity in the New Europe. Routledge, New York. 1994. Pp. 13–30.
30. Lootsma B. Biomorp Landscape Urbanism. *Topos*. 2002. Vol. 40. Pp. 10–25.
31. Latz P. Duisburg North Landscape Park. *Anthos*. Issue 3. 1992. Pp. 27–32.
32. Corner J. Terra Fluxus. In: The Landscape Urbanism Reader. New York: Princeton Architectural Press. 2006. Pp. 21–33.

33. Rumyantseva A.V., Samojlov E.K., Berezyuk M.V., Plastinina Yu.V. Renovation of industrial heritage sites: environmental and economic aspects [Renovaciya ob`ektov industrial'nogo naslediya: e`kologo-e`konomicheskie aspekty]. *E`konomika, predprinimatel'stvo i pravo*. 2023. Vol. 13. No. 6. Pp. 1983–1996. DOI:10.18334/epp.13.6.117775 (rus)

34. Louvi A. Viable and compatible uses in old factories. Poria. Athens, Greece. 2007. 299 p.

35. Abalos I. Recycling Madrid: Abalos and Herreros, Actar, Barcelona. ES. 2001. 26 p.

36. Weilacher U. Syntax of Landscape: The Landscape Architecture by Peter Latz and Partners. Basel Berlin Boston: Birkhauser Publisher. 2008. 105 p.

37. Shein V.V. Directions of reconstructed industrial buildings transformation on the example of southern region objects [Napravleniya transformacii rekonstruiroemy`x promy`shlenny`x zdaniy na primere ob`ektov Yuzhnogo federal'nogo okruga] Belgorod: Publishing House of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 9. Pp. 62–67.

(rus)

38. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Manokhin P.E. The main trends of modern projects the renovation of industrial zones [Osnovny`e tendencii sovremenny`x proektov renovacii promy`shlenny`x zon]. *Fundamental research*. 2016. Vol. 12–2. Pp. 400–404. (rus)

39. Nazarenko V.V. Assessment of the competitiveness of products and enterprises as a basis for planning its activities [Ocenka konkurentosposobnosti produkcii i predpriyatiya kak osnova planirovaniya ego deyatel'nosti]. *Bulletin of Belorussian national technical university: scientific-technical journal*. 2007. No. 1. Pp. 67–73.

40. Allen T.J. The Organization and Architecture of Innovation. Managing the Flow of Technology. Amsterdam, Tokyo: Elsevier. 2007. 136 p.

41. Palang H., Soini K., Printsman A., Birkeland I. Landscape and cultural sustainability. *Norsk Geografisk Tidsskrift. Norwegian Journal of Geography*. 2017. Vol. 71. 3. Pp. 127–131. DOI:10.1080/00291951.2017.1343381

Information about the authors

Shein, Valeria V. Senior lecturer. E-mail: va_in@list.ru. Don State Technical University. Russia, 344003, Rostov-on-Don, Gagarin square, 1.

Received 26.04.2024

Для цитирования:

Шейн В.В. Эстетические модели вхождения восстанавливаемых промышленных объектов в структуру окружающей застройки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 81–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-81-94

For citation:

Shein V.V. Aesthetical models of inclusion recovered industrial objects into exsisting urban structure. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 9. Pp. 81–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-81-94

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-95-105

Олейников А.А., Гнездилов Д.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: sharrif@yandex.ru*

ПРИМЕНЕНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕНОВАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Аннотация. С развитием современных цифровых технологий, многие отрасли стали нуждаться в создании и развитии инструментов для обработки и систематизации информации, их визуальном представлении. В архитектурной и градостроительной сфере цифровые технологии нашли свое отражение в применении технологий информационного моделирования (BIM-моделирования), которые эффективно применяются в процессах проектирования, при строительстве различных объектов и их дальнейшей эксплуатации. В данном исследовании рассматривается эффективность применения BIM-технологий при разработке проектов по реновации и реконструкции урбанизированных территорий. Трехмерное моделирование BIM- технологий в проектах реновации и реконструкции позволяет смоделировать сценарии развития вырабатываемых концепций и проектных решений, оценить эффективность их влияния на территории, спрогнозировать дальнейшее их развитие. Посредством применения BIM-технологий в проектах по реновации и реконструкции возможно осуществлять надзор за процессом реализации разработанных решений, контролировать текущее состояние локальных объектов после их ввода в эксплуатацию, выявлять и предупреждать развитие кризисных ситуаций. Авторами рассмотрено определение технологии информационного моделирования, а приведены некоторые основные способы использования BIM-технологий. Основные этапы работы над BIM-моделью при реновации и реконструкции территории уточнены и выделены в четыре основных этапа: этап сбора данных о существующем положении; этап построения модели существующего положения; этап разработки проектного предложения реновации и реконструкции и этап создания дополнительных информационных моделей и детальная проработка объектов. На основе проведенного анализа города Белгорода, обоснована необходимость проведения реновации и реконструкции территории микрорайона «Савино», разработано проектное предложение по реновации и реконструкции с применением BIM-технологий.

Ключевые слова: BIM, BIM-технологии, BIM-моделирование, BIM-проектирование, реновация, реновация территорий, реновация жилья.

Введение. Одной из основных проблем в сфере архитектуры и градостроительства является наличие большого количества ветхого и морально устаревшего, а зачастую и аварийного жилого фонда. Его дальнейшее эффективное использование невозможно без проведения мероприятий, направленных на улучшение жилищных условий, в частности – без реновации и реконструкции жилой среды в целом. Ввиду того, что с ускоренным темпом развития компьютерных технологий инструментарий специалистов меняется и становится более современным и эффективным, применение BIM-технологий непосредственно в процессах реновации и реконструкции видится наиболее актуальным и нуждающимся в выработке новых методов и подходов для дальнейшего практического применения.

Целью данного исследования является обоснование эффективности применения BIM-технологий в процессах реновации и реконструкции жилой застройки. Объектом исследования является сложившаяся планировочная структура микрорайона «Савино» города Белгорода. В задачи исследования входит: 1) уточнение этапов работы

над BIM-моделью при реновации и реконструкции территорий; 2) разработка проекта реновации и реконструкции микрорайона «Савино» в г. Белгороде посредством технологий BIM-моделирования с учетом уточненных этапов работы над BIM-моделью.

Степень изученности проблемы. В основу исследования легли избранные труды Ложкина Н.Д.; Дмитриевой Т.Л., Ященко В.П., Курышова И.А., изучающие применение BIM-технологий в современном проектировании. Применение BIM-технологий в строительной и градостроительной отрасли отражены на основе работ Василенко А.А., Арутюнян М.С., Коренева В.И., Кочкарова Н.О. Особенности процессов реновации и реконструкции, в том числе на примере г. Белгорода, приводятся из исследований Киевского Л.В., Кореньковой Г.В., Митякиной Н.А., Белых Т.В., Дороховой Е.И., Бобылевой Е.В., Абакумова Р.Г., Олейникова А.А., Арслан М.И., Перцева В.В. и др.

Несмотря на довольно обширную базу, касающуюся непосредственно BIM-технологий, тема реновации и реконструкции жилой застройки с применением BIM-моделирования требует более

детального рассмотрения и изучения, а также выработки новых научных подходов для дальнейшего внедрения в процессы строительства.

Материалы и методы. В исследовании применен комплексный подход и методы комплексного анализа. В ходе исследования был проведен анализ литературных источников, проектного опыта, а также сложившейся к настоящему времени базы BIM-моделирования. Проведено обследование территорий микрорайона «Савино», изучено и проанализировано текущее состояние жилого фонда массовых серий. Также в ходе исследования применялись графоаналитические методы, в том числе метод трехмерного моделирования с применением BIM-технологий, а также структурный анализ.

Основная часть. Технологии информационного моделирования BIM (BIM – «информационная модель здания») представляют собой комплексный подход к созданию проекта и его параметрической информационной модели от раннего концептуального решения вплоть до ввода объекта в эксплуатацию. В информационную модель закладывается определенная иерархическая система данных об объекте с различным уровнем доступа к информации. Вся информация об элементах объекта систематизируется в информационном пространстве, которая по своей сути представляется базой данных. База данных может включать в себя сведения о технических и эксплуатационных характеристиках, а также информацию о его особенностях имущественного, правового, коммерческого и прочего характера.

BIM-технологии основаны на идее представления физической модели, состоящей из архитектурных компонент, компонент инженерных систем, элементов строительных конструкций, стройплощадки, внутренней и окружающей обстановки, в универсальном информационном виде [1]. Кроме того, следует отметить, что BIM-технологии ориентированы на проектирование в «сквозном» формате (автоматически выполняется синхронизация календарных графиков подачи и расхода материалов, оптимизируется работа транспортных систем, ведется бухгалтерский учёт и т.п.) [2, 3]. Через комплексное синхронное взаимодействие всех участников проектирования на основе информационной модели происходит одновременная работа над объектом вплоть до его строительства и дальнейшей эксплуатации.

Использование BIM-технологий возможно несколькими способами.

1. Моделирование трехмерной визуализации, максимально точной и верно передающей параметры и особенности объекта моделью.

2. Объединенное хранение данных, при котором все данные по объекту находятся во взаимосвязи на базе единого программного комплекса.

3. Комплексное управление данными, в ходе которого все изменяемые параметры провоцируют автоматический пересчет различных параметров и процессов.

Для создания информационных моделей по типу BIM чаще всего применяются системы автоматизированного проектирования (САПР или подсистемы САПР), которые по целевому назначению обеспечивают различные аспекты проектирования [4, 5] и реализуют BIM технологии на основании формирования физической модели здания в универсальном параметрическом виде, представленным единым файлом [1]. Так же на сегодняшний день существует множество программных комплексов на основе BIM-технологий, которые предназначены для информационного моделирования и проектирования, а также управления информационными моделями – в соответствии с BIM технологиями разработаны такие программные продукты как ArchiCAD компании Graphisoft, Компас компании Аскон и Revit Architecture компании Autodesk [1].

Этапы работы над BIM-моделью при реновации и реконструкции территории. В разработке предложения по реновации и реконструкции территории можно выделить следующие этапы: сбор данных о существующем положении, построение модели существующего положения, разработка проектного предложения, создание дополнительных информационных моделей.

1 этап. Сбор данных о существующем положении. Первый подготовительный этап необходим для сбора информации о существующем положении. Производятся топографическая съемка территории (в том числе с помощью беспилотных летательных аппаратов). Формируется цифровая модель местности, производится сбор данных о физическом состоянии объектов, степени их износа и т.д. Этап является подготовительным, в ходе которого производится сбор и систематизация информации о существующем положении для дальнейшей работы с территорией. Наличие оцифрованной картографической информации и возможности наполнения ее семантическими данными дает возможность создать любой тематический реестр объектов [6].

2 этап. Построение модели существующего положения. На данном этапе происходит разработка 3D модели в обобщенном виде без детальной проработки. Набирается рельеф как территории проектирования, так и сопредельных с ней земель. В 3D-модель производится перенос

улично-дорожной сети проекта планировки территории, природного каркаса, зданий и сооружений, инженерных коммуникаций и пр. Этап предусматривает насыщение модели информацией по объекту: указываются радиусы обслуживания социальной инфраструктуры, вносится информация по остановкам общественного транспорта и т.д. Особенно важным на данном этапе является определение зданий непосредственно под реконструкцию, реновацию или снос. Этап является отправной точкой для возможности разработки и принятия проектных решений на стадии проекта планировки.

3 этап. Разработка проектного предложения реновации и реконструкции. На третьем этапе разрабатывается непосредственно проект планировки. Разрабатываются проектные решения размещения жилой застройки, благоустройства дворовых пространств, формируется дорожно-уличная сеть линейных объектов при их наличии, разрабатываются решения для линейных объектов при их наличии. Размещаются проектируемые объекты социальной инфраструктуры. Проектируемые здания показываются с наличием технико-экономических показателей. На данном этапе возможно построение инсоляционных графиков территории при различных условиях размещения объектов, рассчитывается плотность застройки, количество планируемых к размещению жителей и т.д. Программным комплексом формируется комплект чертежей, ведомостей, спецификаций и т.д.

4 этап. Создание дополнительных информационных моделей и детальная проработка объектов. На данном этапе формируются вспомогательные модели в соответствии с поставленными задачами. К таким моделям можно отнести всевозможные модели сценарного развития территории. Также на данном этапе разрабатываются уточняющие локальные архитектурные 3D модели зданий и сооружений. Их сопровождает полный комплект всех необходимых чертежей, которые требуются для формирования комплекта документов разделов архитектурных, конструктивных и прочих решений. Программами производится расчет требуемых параметров составляющих элементов здания, формируются рабочие чертежи, рассчитывается объем работ, сметная стоимость, рассчитываются и вводятся в 3D модель инженерные сети и их параметры (тепловые потери конструкций, естественная освещенность и т.д.) [7].

Таким образом, реновация и реконструкция урбанизированных территориях в технологиях информационного моделирования представляется в виде модели, которая включает в себе

большое количество информации. Содержательная математическая модель реновации позволяет рассматривать процесс переустройства жилых территорий [8, 9] в масштабе города как систему взаимосвязанных реальных параметров, исследовать и рассчитывать сроки, этапы, объемы реализации программы [10]. По завершении строительства, BIM-модель не утрачивает свою актуальность, она может использоваться для дальнейшей эффективной эксплуатации объекта. Необходимая информация может фиксироваться установленными датчиками и передаваться непосредственно в BIM-модель, посредством чего может контролироваться работа инженерных коммуникаций и пр.

Обоснование актуальности разработки проекта реновации и реконструкции микрорайона «Савино» г. Белгорода. По степени износа жилой фонд г. Белгорода распределяется следующим образом: до 30 % износа – 62,7 % жилого фонда; от 30 до 60 % – 37,1 %; свыше 60 % – 0,2 % [11]. Из данных показателей следует, что многие территории г. Белгорода нуждаются в проведении в их границах мероприятий по реновации и реконструкции жилого фонда, а соответственно и городской среды. В ходе настоящего исследования была выявлена территория г. Белгорода, особенно остро нуждающаяся в реновации и реконструкции [12]. Данной территорией является микрорайон «Савино» в северном планировочном районе г. Белгорода. Выявлено, что рассматриваемая территория не реализует свой потенциал в полной мере, нуждается в трансформации территорий, а также увеличении плотности застройки.

Проект реновации и реконструкции микрорайона «Савино» разрабатывается авторами на основе уточненных этапов работы над BIM-моделью при реновации и реконструкции территории.

1 этап. Сбор данных о существующем положении.

Анализ современного состояния микрорайона «Савино» г. Белгорода показал следующее. Общая площадь микрорайона – 326 588,15 м². На момент проводимого исследования, основываясь на Плане землепользования и застройки (ПЗЗ) г. Белгорода актуальной редакции [13], выявлено, что для микрорайона «Савино» характерно наличие в своих границах следующих функциональных зон:

- зона индивидуальной жилой застройки домами коттеджного типа с приусадебными участками;
- зона автомобильного транспорта и улично-дорожной сети;

2 этап. Построение модели существующего положения.

Построение модели существующего положения микрорайона «Савино» позволяет сформировать объемную насыщенную информацией модель территории проектирования и прилегающих к ней территорий (рис. 4). На основе смоделированной модели возможно выявить внутренние территории, чье использование, архитектурно-пространственная и функциональная организация на сегодняшний день не соответствует их градостроительной значимости и потенциалу и предполагает реновацию и восстановление объектов недвижимости [16]. При реновации зачас-

тую происходит значительное увеличение плотности застройки (повышение этажности, увеличение площади застроенной территории, увеличение числа жителей), что приводит к проблеме отсутствия социальной ориентированности на гуманную плотность застройки, универсальности дизайна архитектурной среды и общественных пространств, проницаемости жилой среды, стилистической цельности [17, 18]. Построение информационно насыщенной модели, отображающей реальное положение территории, позволило выработать наиболее эффективные решения в ходе проведения реновации и реконструкции территории микрорайона.

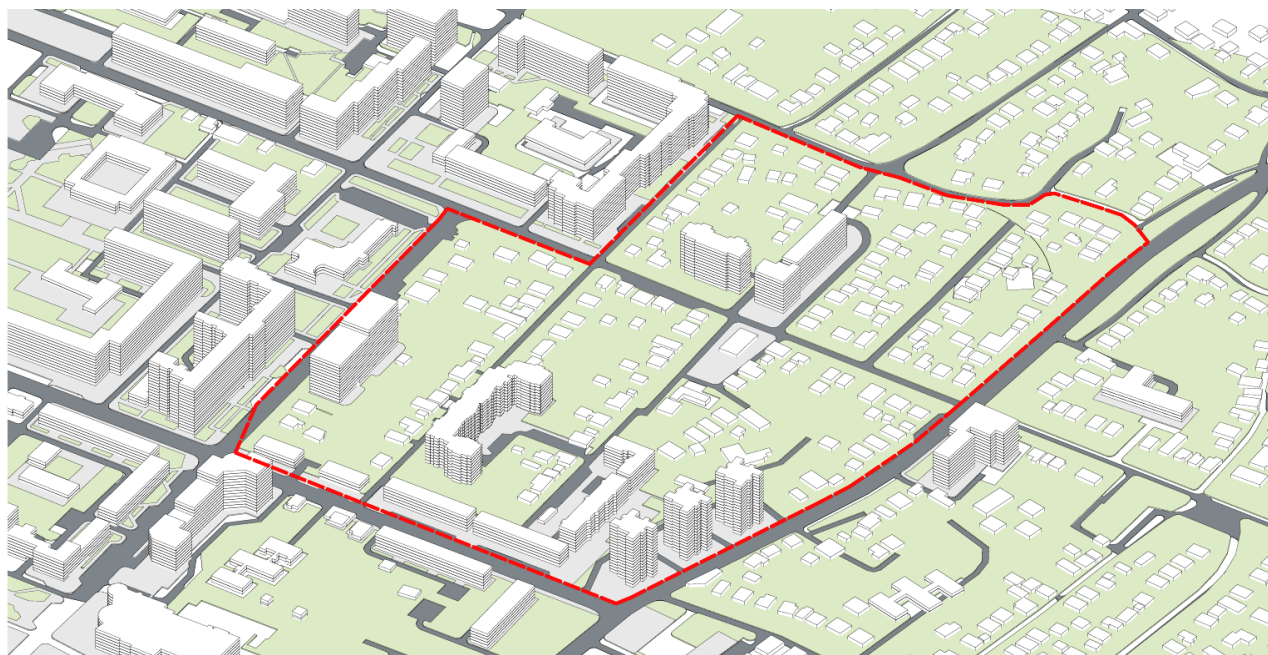


Рис. 4. Модель существующего состояния микрорайона «Савино» и прилегающих к нему городских территорий. Сост. Олейников А.А.

3 этап. Разработка проектного предложения реновации и реконструкции.

Несмотря на то что, при полном сносе существующих объектов и строительстве новых по функциям комплексов с нуля зачастую значительно увеличиваются затраты на снос объектов, на расчистку территории и так далее [19], проведение реконструкции на территории микрорайона «Савино» видится необходимым мероприятием. Авторами предлагается реконструкция территорий и объектов микрорайона ввиду их несоответствия современным технико-эксплуатационным и моральным требованиям. Реконструкция предполагает снос малоэтажной кирпичной застройки общей площадью 21 108 м² (рис. 5), реорганизацию дорожно-транспортной сети. Под реновацию отводится сохраняемая многоэтажная жилая застройка.

Проектом предлагается реорганизация микрорайона и разбивка его на семь кварталов с площадными показателями от 9 945 м² до 39 600 м²

(рис. 7). Организация кварталов предусматривается с четким разграничением на private внутридворовые территории и public внутриквартальные пространства. Все элементы жилых территорий организуются в пешей доступности.

Зачастую реновация жилого фонда проводится без проведения мероприятий по реновации или реконструкции системы предприятий социально-бытового и культурного обслуживания, которые сохраняются, в лучшем случае, в старом объеме и приводит к ухудшению качества обслуживания населения и снижению комфортности среды [20]. К существующим объектам социальной инфраструктуры, в частности к детским садам и школам, предлагается дополнение в виде проектируемых в структуре микрорайона детских садов на площади территории в 7 655,94 м². Кроме социальной сферы, в микрорайоне так же предлагается развитие коммерческих объектов и размещение по ул. Калинина торгового центра на

площади 4 257м². Общий вид территории согласно проектному предложению представлен на

рис. 7.

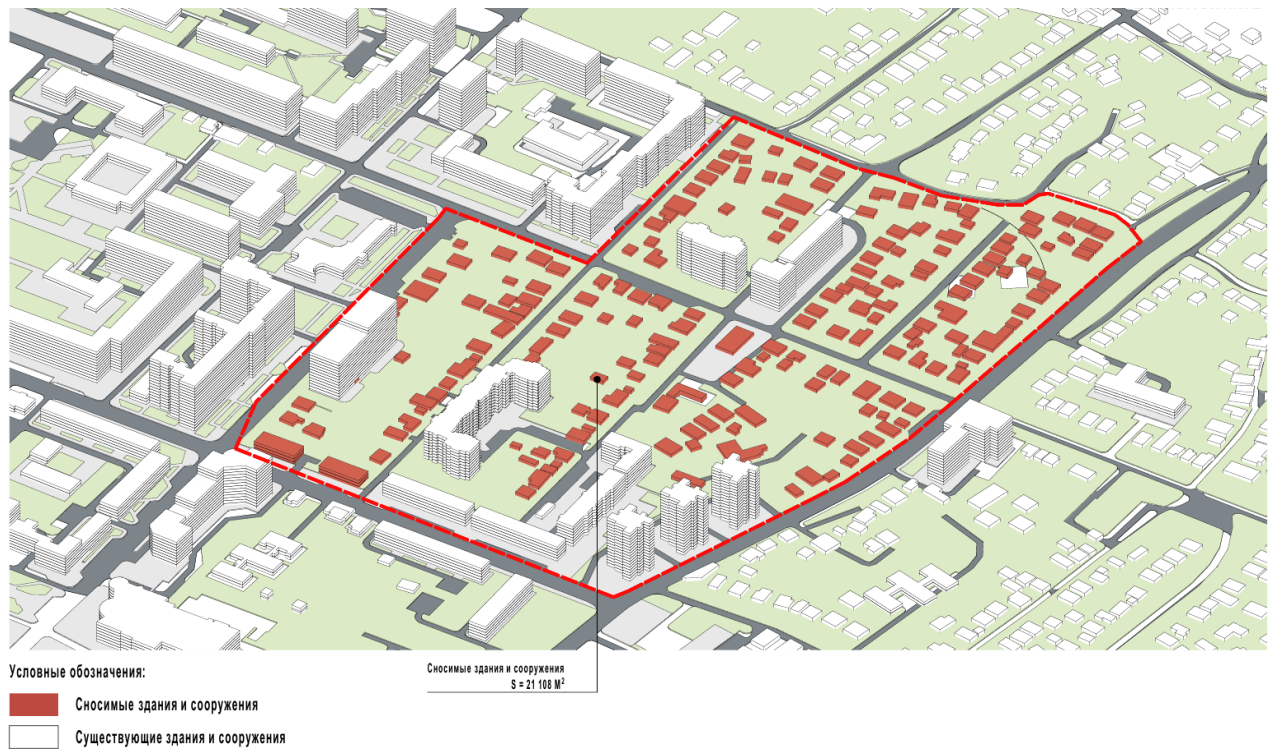


Рис. 5. Объекты капитального строительства микрорайона «Савино», предназначенные под снос.
Сост. Олейников А.А.

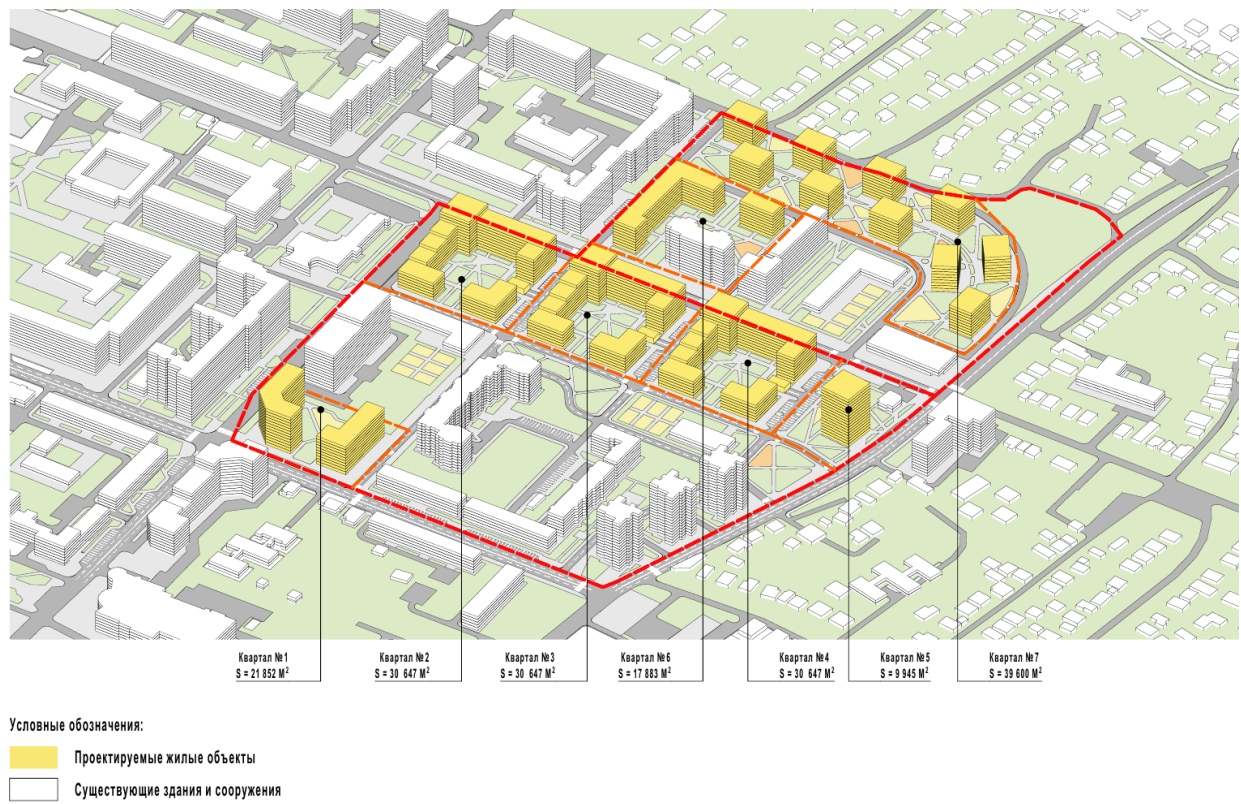


Рис. 6. Модель размещения проектируемых жилых объектов.
Сост. Олейников А.А.

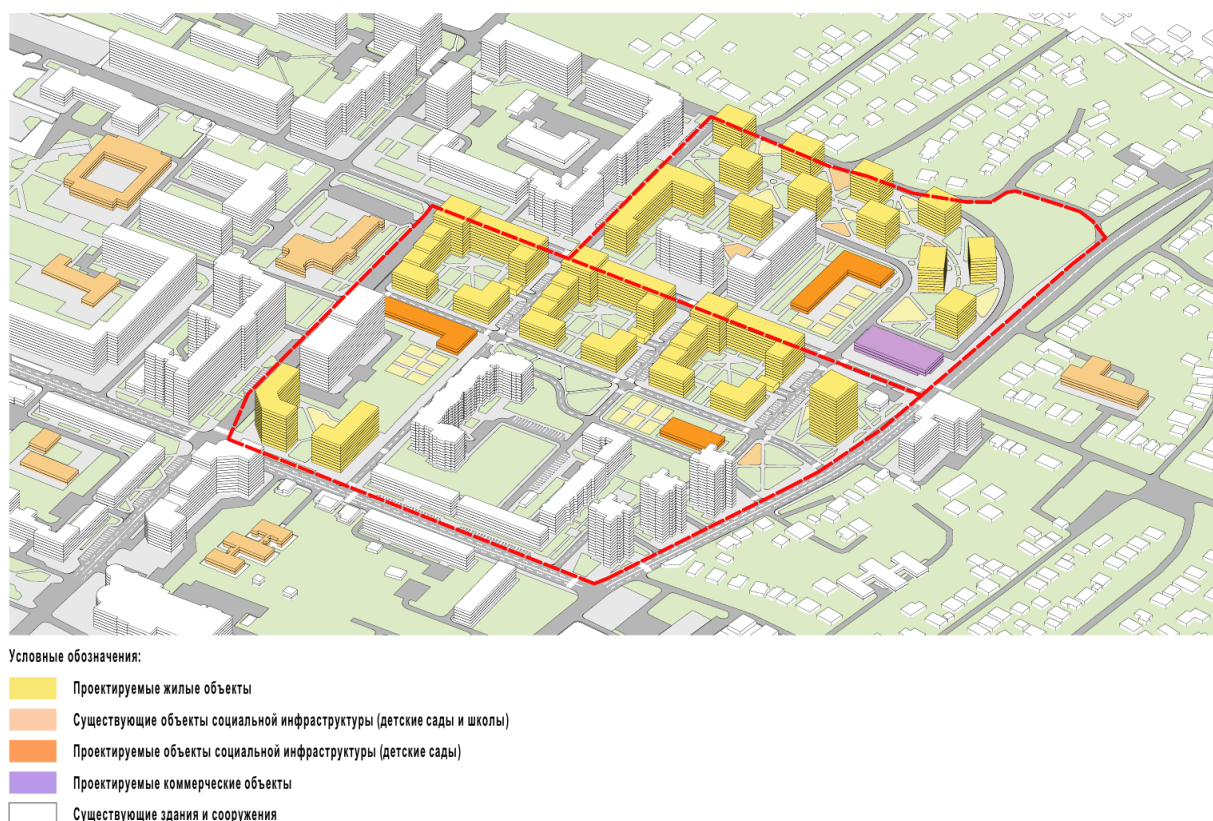


Рис. 7. Проектное предложение реновации и реконструкции микрорайона «Савино».

Сост. Олейников А.А.

4 этап. Создание дополнительных информационных моделей и детальная проработка объектов.

На данном этапе производится насыщение

модели информацией касательно характеристики возводимых объектов – этажности зданий, их конструктивные характеристики, информация по используемым материалам и пр.

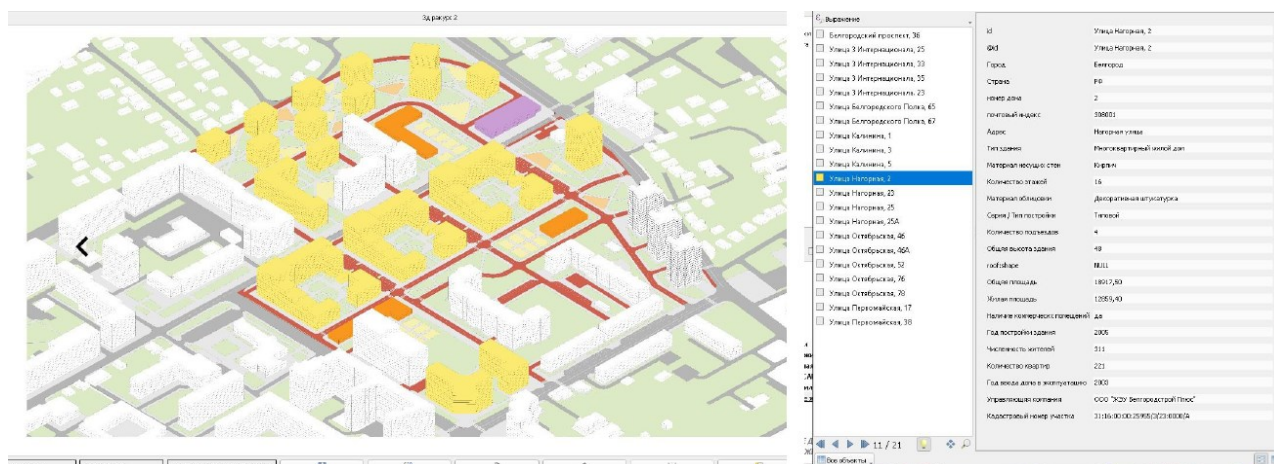


Рис. 8. Проектное предложение реновации и реконструкции микрорайона «Савино», детальная проработка.

Сост. Олейников А.А.

При дальнейшем развитии проекта в рабочий проект, реалистичная трехмерная модель реконструкции и реновации территории позволит получать информацию об архитектурно-планировочных особенностях организуемого микрорайона. Кроме того, специалистами может беспрепятственно проводится работа по мониторингу и контролю соблюдения параметров застройки, выявляться неточности и отклонения,

допущенные непосредственно при застройке территорий.

Вывод. По итогам проведенного исследования авторами рассмотрены определения BIM-технологиям, их основные особенности и специфика работы, которая заключается в одновременном нахождении в одном рабочем цифровом пространстве специалистов различных направлений. Основные этапы работы над BIM-моделью при реновации и реконструкции территории

уточнены и представлены в виде четырех последовательных этапов: этап сбора данных о существующем положении; этап построения модели существующего положения; этап разработки проектного предложения реновации и реконструкции и этап создания дополнительных информационных моделей и детальная проработка объектов. Проведенный анализ города Белгорода выявил необходимость проведения реновации и реконструкции территории микрорайона «Савино». Согласно уточненным этапам реновации и реконструкции территорий, приведенным авторами, предложен эскизный проект развития территории «Савино» с использованием BIM-технологий. Повсеместное внедрение BIM-технологий позволит обновить и улучшить качественные и количественные показатели жилого фонда микрорайона, сформировать качественную городскую среду, инвестиционно-привлекательную территорию с положительным имиджем и большим потенциалом к развитию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Василенко А.А., Арутюнян М.С. BIM проектирование в строительстве // Экологические, инженерно-экономические, правовые и управленческие аспекты развития строительства и транспортной инфраструктуры: сборник статей Международной научно-практической конференции, Краснодар, 27–28 ноября 2017 года / ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Институт строительства и транспортной инфраструктуры; ФГБОУ ВО «КубГТУ»; Международный центр инновационных исследований «OMEGA SCIENCE». Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2017. С. 30–32.
2. Дмитриева Т.Л., Яценко В.П., Курышов И.А. BIM как средство сквозного проектирования, технологии возведения и эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. №2 (45). С. 252–261. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-252-261
3. Шевченко А.А., Мелитонян А.А. Методология создания BIM моделей и творческая составляющая в процессе BIM проектирования // Экологические, инженерно-экономические, правовые и управленческие аспекты развития строительства и транспортной инфраструктуры: сборник статей Международной научно-практической конференции, Краснодар, 27–28 ноября 2017 года / ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Институт строительства и транспортной инфраструктуры; ФГБОУ ВО «КубГТУ»; Международный центр инновационных исследований «OMEGA SCIENCE». Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2017. С. 168–172.
4. Edwards R.E., Lou E., Bataw A., Kama-ruz-zaman S.N., Johnson Ch. Sustainability-led design: Feasibility of incorporating whole-life cycle energy assessment into BIM for refurbishment projects // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 24. Pp. 97–106.
5. Ложкин Н.Д. BIM-технологии проектирования // Colloquium-journal. 2020. №11 (63). С. 17–20.
6. Корнев В.И. Использование цифровых технологий и 3D-моделирования в градостроительной деятельности (на примере города Томска) // Вестник ТГАСУ. 2020. №6. С. 70–82. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-70-82
7. Кочкаров Н.О. BIM технологии в строительстве // Форум молодых ученых. 2019. № 2 (30). С. 832–834
8. Киевский И.Л., Гришутин И.Б., Киевский Л.В. Рассредоточенное переустройство кварталов (предпроектный этап) // Жилищное строительство. 2017. № 1-2. С. 23–28.
9. Киевский Л.В. Прикладная организация строительства // Вестник МГСУ. 2017. № 3 (102). С. 253–259. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.253-259
10. Киевский Л.В. Математическая модель реновации // Жилищное строительство. 2018. №1-2. С. 3–7. DOI: 10.31659/0044-4472-2018-1-2-3-7
11. 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 Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. №. 1. С. 60–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69.
12. Олейников А.А., Арслан М.И., Перцев В.В. Реновация городских территорий: проблемы и пути решения на примере г. Белгорода // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. №. 7. С. 71–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-7-71-83
13. Правила землепользования и застройки городского округа «Город Белгород» Белгородской области. Федеральная государственная информационная система территориального планирования (ФГИС ТП) [Электронный ресурс]. URL: <https://fgisp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/309787> (дата обращения: 26.04.2024).
14. Генеральный план развития городского округа «город Белгород» до 2035 года. Карта функциональных зон городского округа «город

Белгород». Федеральная государственная информационная система территориального планирования (ФГИС ТП) [Электронный ресурс]. URL: <https://fgisp.economy.gov.ru/files/1470100002020302202305301/fWwpNHKx.pdf> (дата обращения: 26.04.2024).

15. Бобылева Е.В., Абакумов Р.Г. Эффективность реконструкции городской застройки в городе Белгороде // Инновационная наука. 2017. Т. 1, № 4. С. 38–40.

16. Авилова И.П., Жариков И.С. Методические аспекты экспресс диагностики эффективности инвестиционных процессов при реконструкции объектов недвижимости // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2016. №1. С. 159–163.

17. Редькина П.А., Федоровская А.А. Информационная модель градостроительного обеспечения формирования доступной среды при реконструкции городской застройки // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46).

18. Янковская Ю.С., Меренков А.В. Формирование пешеходной проницаемости жилой застройки как фактор развития социально-ориентированного проектирования // Актуальные проблемы современной архитектуры, градостроительства и дизайна: материалы науч. конф. / Нижегород. гос. архитектурно-строит. ун-т. - Н. Новгород: ННГАСУ. 2019. С. 409–412.

19. Жариков И.С. Методологический подход к учету технического состояния объектов недвижимости при определении их стоимостных характеристик // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2014. № 22. С. 100–104.

20. Самойлова Н.В., Чумаков С.В., Полицинская М.С. Анализ градостроительной практики решения проблемы устаревшего жилого фонда // ИВД. 2023. №1 (97). С. 50–515.

Информация об авторах

Олейников Александр Анатольевич, аспирант. E-mail: sharrif@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гнездилов Денис Васильевич, аспирант. E-mail: gnezdilowd@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.05.2024 г.

© Олейников А.А., Гнездилов Д.В., 2024

***Oleinikov A.A., Gnezdilov D.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

APPLICATION OF BIM TECHNOLOGIES DURING THE RENOVATION AND RECONSTRUCTION OF URBAN AREAS

Abstract. *With the development of modern digital technologies, many industries began to need the creation and development of tools for processing and systematization of information, their visual representation. In the architectural and urban planning sphere, digital technologies are reflected in the application of information modeling technologies (BIM modeling), which are effectively used in the design processes, during the construction of various facilities and their further operation. This study examines the effectiveness of the use of BIM technologies in the development of projects for the renovation and reconstruction of urbanized areas. Three-dimensional modeling of BIM technologies in renovation and reconstruction projects allows to simulate scenarios for the development of produced concepts and design solutions, assess the effectiveness of their impact on the territory, and predict their further development. Through the use of BIM technologies in renovation and reconstruction projects, it is possible to monitor the implementation of the developed solutions, monitor the current state of local facilities after their commissioning, identify and prevent the development of crisis situations. The authors have considered the definition of information modeling technology, and some basic ways of using BIM technologies are given. The main stages of work on the BIM model during renovation and reconstruction of the territory have been clarified and divided into four main stages. The first is the stage of collecting data on the existing situation; the second is the stage of building a model of the existing situation; the third is the stage of developing a project proposal for renovation and reconstruction and the forth is the stage of creating additional information models and detailed study of objects. Based on the analysis of the city of Belgorod, the need for renovation and reconstruction of the territory of the neighborhood "Savino" is justified, a project proposal for renovation and reconstruction using BIM technologies has been developed.*

Keywords: *BIM, BIM technologies, BIM modeling, BIM design, renovation, renovation of territories, renovation of housing.*

REFERENCES

1. Vasilenko A.A., Harutunyan M.S. BIM design in construction [BIM proyektirovaniye v stroitel'stve]. Environmental, engineering, economic, legal and managerial aspects of the development of construction and transport infrastructure : collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, November 27-28, 2017. Kuban State Technological University, Institute of Construction and Transport Infrastructure; KubSTU; International Center for Innovative Research «OMEGA SCIENCE». Krasnodar: OMEGA SCIENCES Limited Liability Company, 2017. Pp. 30–32. (rus)
2. Dmitrieva T.L., Yashchenko V.P., Kuryshov I.A. BIM as a means of end-to-end design, construction and operation technology [BIM kak sredstvo skvoznogo proyektirovaniya, tekhnologii vozvedeniya i ekspluatatsii]. News of universities. Investments. Construction. Real estate. 2023. No. 2 (45). Pp. 252–261. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-252-261 (rus)
3. Shevchenko A.A., Melitonyan A.A. Methodology for creating BIM models and the creative component in the BIM design process [Metodologiya sozdaniya BIM modeley i tvorcheskaya sostavlyayushchaya v protsesse BIM proyektirovaniya]. Environmental, engineering, economic, legal and managerial aspects of the development of construction and transport infrastructure: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, November 27–28, 2017. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban State Technological University», Institute of Construction and Transport Infrastructure; FSBEI HE «KubSTU»; International Center for Innovative Research «OMEGA SCIENCE». Krasnodar: Limited Liability Company «OMEGA SCIENCE», 2017. Pp. 168–172. (rus)
4. Edwards R.E., Lou E., Bataw A., Kama-ruz-zaman S.N., Johnson Ch. Sustainability-led design: Feasibility of incorporating whole-life cycle energy assessment into BIM for refurbishment projects. Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 24. Pp. 97–106.
5. Lozhkin N.D. BIM design technologies [BIM tekhnologii v stroitel'stve]. Colloquium-journal. 2020. No. 11 (63). Pp. 17–20. (rus)
6. Korenev V.I. The use of digital technologies and 3D modeling in urban planning (on the example of the city of Tomsk) [Ispol'zovaniye tsifrovyykh tekhnologiy i 3D-modelirovaniya v gradostroitel'noy deyatel'nosti (na primere goroda Tomsk)]. Bulletin of TGASU. 2020. No. 6. Pp. 70–82. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-70-82 (rus)
7. Kochkarov N.O. BIM technologies in construction [BIM tekhnologii v stroitel'stve]. Forum of young scientists. 2019. No. 2 (30). pp. 832–834. (rus)
8. Kiyevskiy I.L., Grishutin I.B., Kyiv L.V. Dispersed redevelopment of neighborhoods (pre-project stage) [Rassredotochennoye pereustroystvo kvartalov (predproyektnyy etap)]. Housing construction. 2017. No. 1-2. Pp. 23–28. (rus)
9. Kiyevskiy L.V. Applied organization of construction [Prikladnaya organizatsiya stroitel'stva]. Bulletin of MGSU. 2017. No. 3 (102). Pp. 253–259. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.253-259 (rus)
10. Kiyevskiy L.V. Mathematical model of renovation [Matematicheskaya model' renovatsii]. Housing construction. 2018. No. 1-2. Pp. 3–7. DOI: 10.31659/0044-4472-2018-1-2-3-7 (rus)
11. 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 renovatsionnykh processov v zhilishchnoy sfere krupnykh gorodov Rossii (na primere goroda Belgoroda)]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. № 1. Pp. 60–69. DOI 10.34031/2071-7318-2021-7-1-60-69 (rus)
12. Oleinikov A.A., Arslan M.I., Percev V.V. Renovation of urban territories: problems and solutions on the example of Belgorod. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 7. Pp. 71–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-7-71-83 (rus)
13. Rules for land use and development of the urban district Belgorod of the Belgorod region [Pravila zemlepol'zovaniya i zastroyki gorodskogo okruga «Gorod Belgorod» Belgorodskoy oblasti]. The Federal State Information System for Territorial Planning (FSIS TP). [Electronic resource]. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/309787> (access date: 04/26/2024). (rus)
14. Master plan for the development of the urban district «city of Belgorod» until 2035. Map of functional zones of the urban district «city of Belgorod» [General'nyy plan razvitiya gorodskogo okruga «gorod Belgorod» do 2035 goda. Karta funktsional'nykh zon gorodskogo okruga «gorod Belgorod»]. Federal State Information System for Territorial Planning (FSIS TP) [Electronic resource]. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/files/1470100002020302202305301/fWwpHKx.pdf> (access date: 04/26/2024). (rus)
15. Bobyleva E.V., Abakumov R.G. Efficiency of reconstruction of urban development in the city of

Belgorod [Effektivnost' rekonstruktsii gorodskoy zastroyki v gorode Belgorode]. Innovative science. 2017. T. 1, No. 4. Pp. 38–40. (rus)

16. Avilova I.P., Zharikov I.S. Methodological aspects of express-diagnostics of effectiveness of investment processes in the reconstruction of real estate objects [Metodicheskiye aspekty ekspress diagnostiki effektivnosti investitsionnykh protsessov pri rekonstruktsii ob'yektov nedvizhimosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 1. Pp. 159–163. (rus)

17. Redkina P.A., Fedorovskaya A.A. Information model of urban planning support for the formation of an accessible environment during the reconstruction of urban development [Informatsionnaya model' gradostroitel'nogo obespecheniya formirovaniya dostupnoy sredy pri rekonstruktsii gorodskoy zastroyki]. Engineering Bulletin of the Don. 2017. No. 3 (46). (rus)

18. Yankovskaya Yu.S., Merenkov A.V. Formation of pedestrian permeability of residential buildings as a factor in the development of socially

oriented design [Formirovaniye peshekhodnoy pronitsayemosti zhiloy zastroyki kak faktor razvitiya sotsial'no-oriyentirovannogo proyektirovaniya]. Current problems of modern architecture, urban planning and design: scientific materials. conf. Nizhny Novgorod. state architectural-builds. univ. N. Novgorod: NNGASU. 2019. Pp. 409–412. (rus)

19. Zharikov I.S. Methodological approach to accounting for the technical condition of real estate objects in determining their cost characteristics [Methodological approach to accounting for the technical condition of real estate objects in determining their cost characteristics]. Intellectual potential of the 21st century: stages of knowledge. 2014. No. 22. Pp. 100–104. (rus)

20. Samoilova N.V., Chumakov S.V., Politsinskaya M.S. Analysis of urban planning practice in solving the problem of outdated housing stock [Analiz gradostroitel'noy praktiki resheniya problemy ustarevshego zhilogo fonda]. IVD. 2023. No. 1 (97). Pp. 50–515. (rus)

Information about the authors

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

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

Received 27.05.2024

Для цитирования:

Олейников А.А., Гнездилов Д.В. Применение BIM-технологий при реновации и реконструкции городских территорий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 95–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-95-105

For citation:

Oleinikov A.A., Gnezdilov D.V. Application of bim technologies during the renovation and reconstruction of urban areas. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 95–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-95-105

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-106-117

**Берро Сомар, Тимофеев А.Н., Кочнева О.В.*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: berro.somar@gmail.com

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАНИПУЛЯЦИОННОЙ РЕАБИЛИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕМОРА КУЛЬТИ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. Проблема точного позиционирования объектов с использованием активного протеза кисти широко не исследована. Разработана неортодоксальная реабилитационная система, оснащенная манипулятором с эластичными звеньями, предназначенная для оказания помощи лицам без кисти (ЛБК) в выполнении тонких движений. В этой системе, силомоментный датчик обеспечивает жесткое соединение между культеприемником и протезом. В данной системе «человек-протез» наличие жесткой связи через силомоментный датчик передает в систему дрожание руки человека, вызывая возмущение, влияющее на точность позиционирования рабочего органа. Разработана математическая модель возмущения тремора, которая используется для оптимизации компонентов системы, исключающей эффект резонанса в системе. Представлены две стратегии управления перемещением рабочего органа между двумя точками. Первая заключается в использовании внешнего устройства, такого как педаль, для управления движениями рабочего органа, а силомоментный датчик используется для регистрации непроизвольных движений культи, вызванных тремором. Вторая основана на использовании силомоментного датчика, с которым ЛБК генерирует управляющий сигнал очень деликатными движениями культи. В Simulink, в соответствии с наличием трех основных типов тремора человека, моделируются движения рабочего органа между двумя точками на расстоянии 5 мм на одной оси. Такое движение аналогично перемещению паяльника в нужную точку для пайки электронного компонента на печатной плате. Результаты показывают, что движение рабочего органа не является плавным по траектории к целевой точке. Также показано, что достижима точность позиционирования 0,1 мм.

Ключевые слова: позиционирование объектов, манипуляционная реабилитационная система, тремор, силомоментный датчик, лицо без кисти, точные движения, система управления.

Введение. Большинство протезов, доступных на рынке, предназначены для выполнения повседневной деятельности и выполнения некоторых работ. Работа по упаковке, вождению и складированию доступна для людей с потерей руки при наличии подходящего протеза. Дилемма возникает, когда протез должен быть спроектирован с возможностью совершать тонкие движения, а также иметь возможность обращаться с тяжелыми предметами. Высококачественные протезы могут обеспечить возможности точного захвата, что позволяет пользователю обращаться с небольшими и хрупкими предметами. Цель исследовательской работы по улучшению естественного движения и контроля протеза для имитации поведения человеческой руки. На данный момент, внешний вид руки успешно имитирован, но восстановление функциональности человеческой руки далеко от реальности [1]. Также существующие решения не удовлетворяют потребностям пациентов, о чем свидетельствует высокий процент отказов от протеза, особенно при ампутациях ниже локтя [2].

В настоящее время, использование электромиограммы (ЭМГ) является распространенным

подходом к активному управлению протезами рук. К сожалению, многие люди без кисти не используют миоэлектрические протезы, потому что их управление неестественно и не интуитивно [3]. В данной статье предлагается альтернативный способ управления разработанного протеза кисти руки с помощью силомоментного датчика, образующего жесткую связь между культей и протезом. Выполнение точных движений с использованием этого способа означает, что любое повреждение нервов или неврологическое расстройство в культе определено влияет на точность позиционирования рабочего органа. Одним из распространенных расстройств является тремор рук. Тремор – непроизвольные, ритмичные, колебательные движения частей тела, обусловленные поочередными или одновременными сокращениями мышц агонистов и антагонистов [4]. Постуральный (нормальный) тремор можно наблюдать при удержании горизонтального положения на фоне действия силы тяжести. Помимо нормального тремора, два других типа тремора считаются заболеванием нервной системы: эссенциальный и паркинсоновский тремор [5]. В данной статье исследуются все указанные виды

тремора с целью определения его влияния на точность позиционирования рабочего органа.

Описание реабилитационной системы. Необходимо интегрировать активный протез в систему, чтобы реабилитировать лиц без кисти (ЛБК) выполнять тонкие движения. Целью реабилитационной системы (рис. 1) является предоставление возможности ЛБК управлять рабочим органом для перемещения инструмента в целевую рабочую точку. Реабилитационная система позволяет ЛБК деликатно изменять положение рабочего органа, помогая ЛБК выполнить простую производственную задачу, такую как вставить и закрепить винт в его отверстие. Выполнение таких задач у здорового человека обычно зависит от его мелкой моторики, которая утрачивается после ампутации руки.

На корпусе протеза 1 установлены с одной стороны через силомоментный датчик 2 культеприемник, и с другой стороны – рабочий орган

(захватное устройство) 3, держащее сменный инструмент 4. В этом корпусе размещен трехступенный манипулятор 5 на базе электроприводов с винтовыми передачами. На выходе микроманипулятора имеется адаптивная опора 6, приспособленная для фиксации на внешних статических объектах в положении, удобном для ЛБК. Подробное описание конструкции данной системы можно найти в двух патентах [6, 7] и ранее опубликованной статье [8].

Использование датчика для соединения манипулятора с культей позволяет пациенту удерживать тяжелые предметы. Кроме того, демпфирующее свойство культи помогает снизить амплитуду вибраций в системе [9]. В то же время патологический тремор культи может повлиять на точность позиционирования системы, что и обсуждается в этой статье.

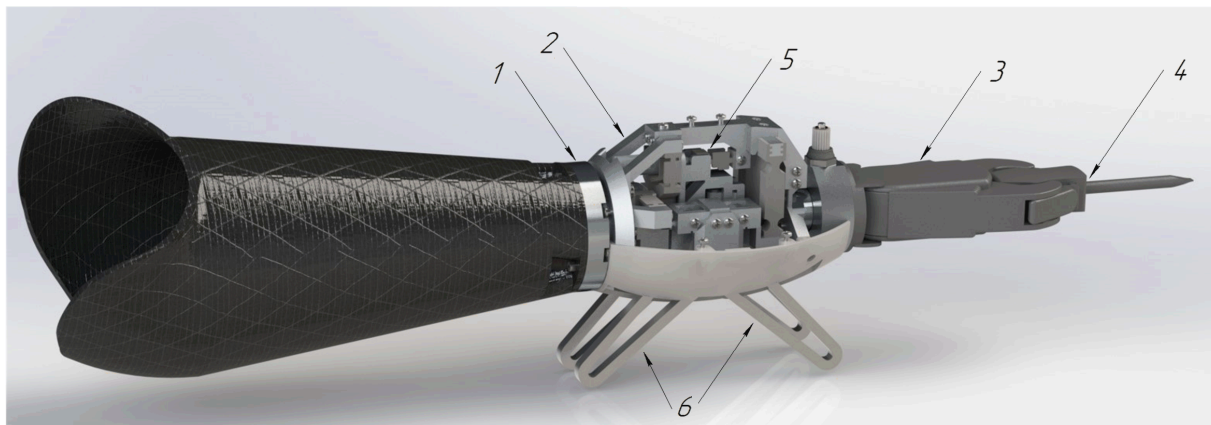


Рис. 1. 3D-модель протеза:

- 1) корпусе протеза, 2) силомоментный датчик, 3) рабочий орган, 4) инструмент, 5) манипулятор, 6) адаптивная опора

В предлагаемой манипуляционной реабилитационной системе, тремор руки ЛБК вызывает колебательные возмущения на рабочем органе, снижая точность позиционирования используемого инструмента. Погрешности позиционирования также зависят от состояния зрения ЛБК. Проблемы с глазами, освещение рабочей зоны и напряжение глаз способствуют ухудшению состояния зрения. Еще одним фактором, влияющим на погрешности позиционирования, является опыт ЛБК. Предварительные тренировки ЛБК с использованием системы увеличивают возможность максимального использования реабилитационной системы.

На точность позиционирования рабочего органа могут повлиять качество механических деталей, приводов и другие факторы, но в данной статье основное внимание уделяется факторам, связанным с ЛБК. Погрешность позиционирования рабочего органа можно определить следующим образом:

$$\Delta(X_{\text{Поз.РО}}) = \Delta_Y + \Delta_E + \Delta_T, \quad (1)$$

где $X_{\text{Поз.РО}}$ – позиция рабочего органа; Δ_Y – погрешность измерения человеческого глаза (ошибки зрения); Δ_E – погрешность, связанная с опытом ЛБК при использовании системы; Δ_T – погрешность, вызванная возмущением тремора.

Работа сосредоточена на анализе влияния тремора на позиционирование рабочего органа, поэтому ошибка зрения добавляется как временная задержка в системе. Также в качестве модели ЛБК в системе управления был выбран опытный пользователь системы реабилитации.

Математическая динамическая модель системы по одной оси-X. Манипулятор в реабилитационной системе содержит три электродвигателя, каждый из которых совмещен с механизмом винт-гайка, и четыре упругих элемента [7]. Эластичные элементы изолируют движения приводов друг от друга. Поэтому для анализа точно-

сти позиционирования движений рабочего органа достаточно использовать одну ось, при этом результаты могут быть применены для других осей. Математическая модель системы «ЛБК-протез» должна адекватно отражать свойства, проявляемые системой в различных условиях. В этом случае культя человека-оператора представлена моделью Войта [10], который содержит параметры механического импеданса m_a , b_a и k_a (рис. 2), обозначающие массу, демпфирование и жесткость остаточной культи соответственно. Произвольные и непроизвольные движения культи ЛБК генерируют силу F_T . Параметр m_c –

масса корпуса протеза, рабочего органа и инструмента, вместе взятых. Параметр m_b – масса манипулятора и основания, вместе взятых. Привод M прикладывает одну и ту же силу F_M к обеим массам m_c и m_b . Опоры основания могут скользить под действием силы механизма F_M , поэтому между опорами и неподвижным твердым объектом (рабочий стол) нежесткое соединение, представлен в виде пружины с жесткостью k_b . Значение жесткости k_s зависит от силомоментного датчика, расположенного между культей и корпусом протеза.

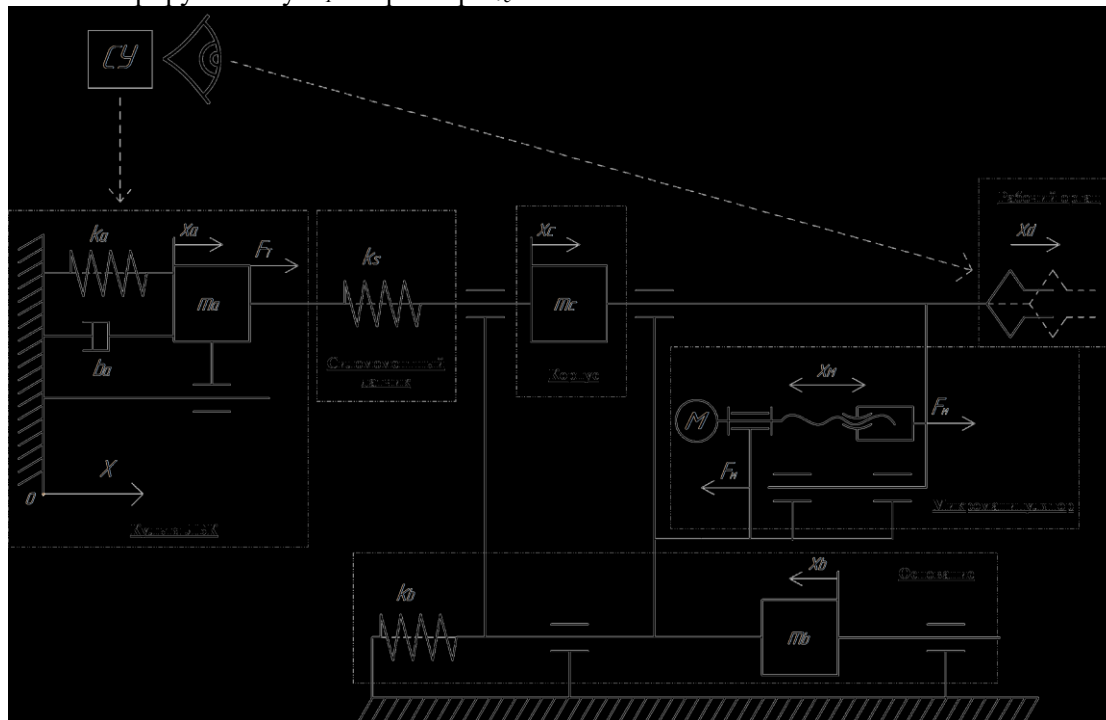


Рис. 2. Расчетная схема математической динамической модели манипуляционной реабилитационной системы по оси-X

Предлагаемая модель (рис. 2) обеспечивает передаточную функцию скорости привода $H_m(s)$, передаточную функцию положения рабочего органа $H_d(s)$ и передаточную функцию возмущающего воздействия из культи на положение рабочего органа $H_{Bos}(s)$, в следующем образом:

$$H_m(s) = \frac{\Omega_M(s)}{E(s)} = \frac{c_{m1}s^5 + \dots + c_{m5}s}{l_{m1}s^7 + \dots + l_{m7}s + l_{m8}}, \quad (2)$$

$$H_d(s) = \frac{X_d(s)}{X_M(s)} = \frac{c_{d1}s^6 + \dots + c_{d6}s + c_{d7}}{l_{d1}s^6 + \dots + l_{d6}s + l_{d7}}, \quad (3)$$

$$H_{Bos}(s) = \frac{X_T(s)}{F_T(s)} = \frac{k_s}{l_{T1}s^4 + \dots + l_{T4}s + l_{T5}}, \quad (4)$$

где E – напряжение якоря двигателя; Ω_M – скорость вращения винта привода; X_M – положение гайки привода (или изменение длины связи между корпусом протеза и основанием протеза);

X_d – положение рабочего органа; X_T – возмущающее воздействие культи на положение рабочего органа; c_m, c_d, l_m, l_d, l_T – коэффициенты, связанные с компонентами модели системы (пружины, массы и приводы). Сила F_T определяется следующим образом:

$$F_T(s) = F_{TP}(s) + F_{ynp}(s), \quad (5)$$

где F_{TP} – сила тремора, вызванная непроизвольными движениями культи ЛБК; F_{ynp} – управляющая сила, вызванная произвольными движениями культи ЛБК для управления положения рабочего органа.

Возмущающее воздействие тремора в реабилитационной системе. В литературе каждый тип тремора характеризуется средней частотой и переменной амплитудой. Но, в целях упрощения, тремор культи моделируется ритмичным колебательным сигналом с определенной амплитудой и частотой. В модели реабилитационной системы,

тремор представляет собой силу F_{TP} , приложенную к массе m_a , и определяется следующим образом:

$$F_T(t) = F_{TP}(t) + (F_{yup}(t) = 0) = A \sin(\omega * t), \quad (6)$$

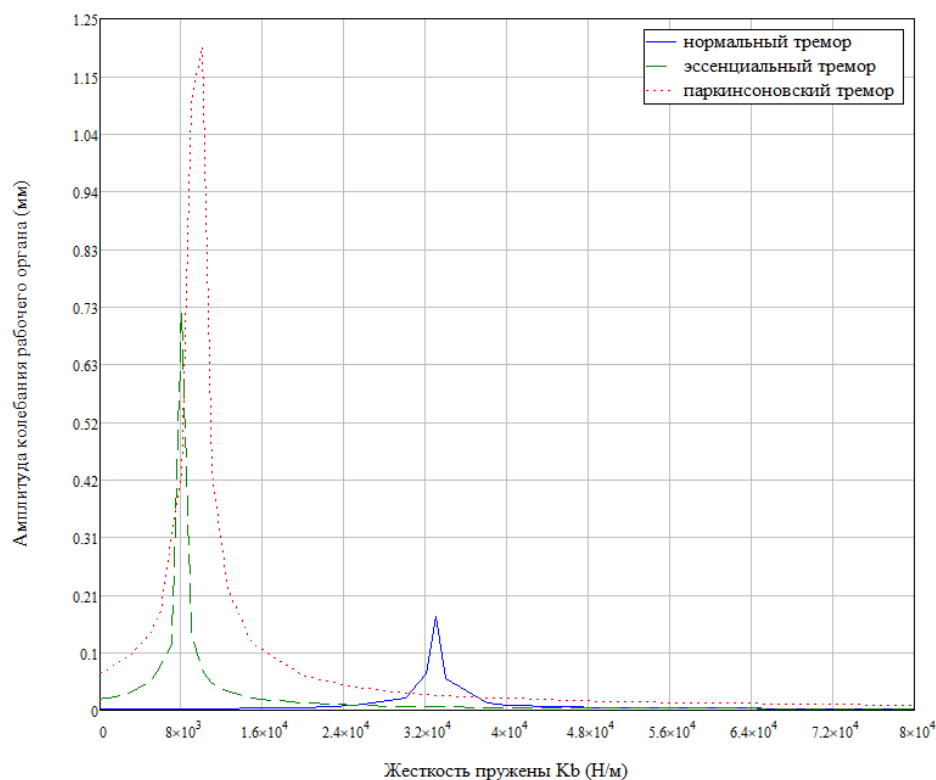
где A – амплитуда тремора; ω – частота тремора.

Во многих исследованиях тремора рук, в которых использовался акселерометр для мониторинга движений тремора [11–13], случайное распределение определяет соотношение между измеренным ускорением и частотой тремора. Используя данные этих исследований, можно рассчитать минимальную и максимальную амплитуду силы тремора и соответствующую ей частоту (таб. 1).

Таблица 1

Параметры силы тремора культи ЛБК

Тип тремора	максимальная амплитуда, мН	частота, рад/с
нормальный	65	63
эссенциальный	152	31
паркинсоновский	648	43

Рис. 3. Зависимости амплитуды колебания рабочего органа от жесткости k_b при наличии тремора культи

Система «ЛБК-протез» и стратегии управления. На основе психофизических исследований человеческого восприятия предполагается, что человек может извлекать информацию о местоположении и скорости при наблюдении за движущимся объектом [16, 17]. В предлагаемой реабилитационной системе, ЛБК является частью динамической модели, а также системы управления. ЛБК наблюдает за рабочим органом, оценивая текущее положение и скорость. Затем

Наличие тремора вызывает постоянное колебательное возмущение на положении рабочего органа. В представленной модели реабилитационной системы (рис. 2), коэффициент усиления колебательного возмущения $H_{Bos}(s)$ можно записать в преобразовании Лапласа следующим образом:

$$\|X_T\| = \lim_{s \rightarrow 0} H_{Bos}(s) = \frac{k_s}{k_s * k_a + k_a * k_b + k_s * k_b}, \quad (7)$$

Значение жесткости культи k_a получено из различных источников [14, 15]. Также жесткость датчика k_s определяется его характеристиками. Когда собственная частота модели реабилитационной системы равна частоте тремора, возникает резонанс. Зависимость амплитуда колебания рабочего органа от жесткости пружины k_b , показаны на рис. 3, где: $m_a = 0,324$ кг; $m_c = 3$ кг; $m_b = 5$ кг; $b_a = 5,92$ Нс/м; $k_a = 104,8$ Н/м; $k_s = 17 \cdot 10^6$ Н/м. Этот график необходимо обновлять в соответствии с эквивалентной моделью каждого ЛБК.

по сигналу ошибки положения, ЛБК вносит необходимые изменения в скорость рабочего органа.

Одним из способов управления рабочим органом является использование человеком внешнего устройства, как показано на рис. 4(а). ЛБК используется внешнее устройство для формирования управляющего сигнала V_c . Управляющий сигнал генерируется джойстиком, педалями или голосовыми командами и может передаваться на

блок управления по проводам или по беспроводной связи. Также, силомоментный датчик используется для обнаружения нарушений движений, вызванных тремором культи. Другой способ управления является использование того же силомоментного датчика, расположенного между культей и телом протеза, для формирования управляющего сигнала V_c , как показано на рис. 4(б). ЛБК прикладывает небольшое усилие к датчику, которое преобразуется в эквивалентное значение скорости рабочего органа. В этом случае, тремор проявляется в виде шума в управляющем сигнале, который необходимо отфильтровать.

Точность зрения различаются от одного лица к другому и между различными условиями

окружающей среды. Модель глаза показывает реакцию на стимул от движущейся цели:

$$G_Y(s) = \frac{1}{\tau_Y s + 1}, \quad (8)$$

где τ_Y – задержка зрения основана на данных, найденных в литературе [18, 19].

Первое приближение к нейромоторной динамической системе состоит из временной задержки, которая регулируется в зависимости от задачи:

$$G_N(s) = \frac{1}{\tau_N s + 1}, \quad (9)$$

где τ_N – нейромоторная задержка определяется экспериментально и составляет от 30 до 600 мс [20].

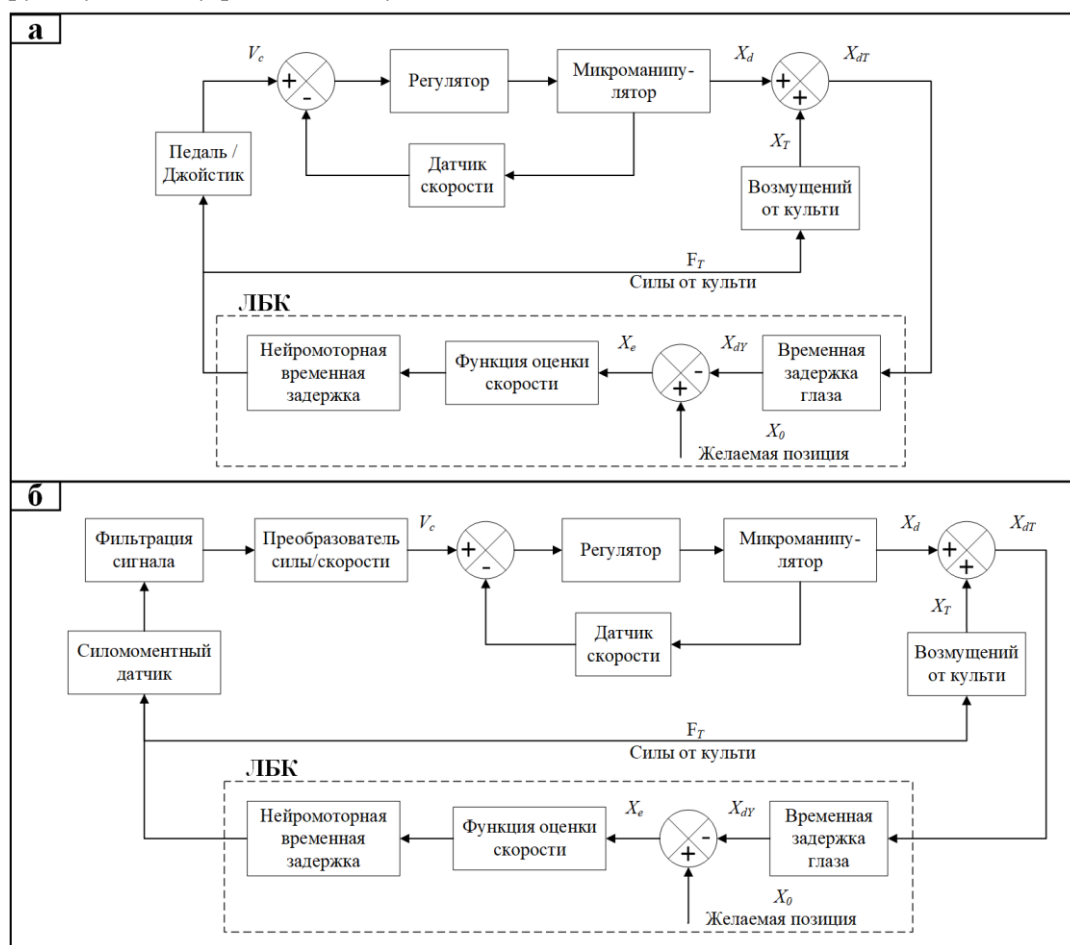


Рис. 4. Функциональная схема «ЛБК-протез» системы.
Управляющий сигнал, генерируемый: а) педалями, б) силомоментным датчиком

В предыдущей публикации установлено, что использование асимметричного профиля скорости является идеальным вариантом управления положением рабочего органа [21]. При стратегии управления, реализуемая ЛБК, в начале движения рабочий орган движется с максимальной скоростью, замедляясь при приближении к рабочей зоне. Предлагаются две конфигурации реабилитационной системы, показанные на рис. 4. Они отличаются друг от друга способом формирования управляющего сигнала. Функция «Оценка

скорости» в модели ЛБК формирует управляющий сигнал V_c , являющегося опорным сигналом контура управления скоростью рабочего органа (рис. 5).

Достигающие движения верхней конечности при захвате объекта характеризуются стереотипным колоколообразным профилем скорости движения руки к цели. Гладкость профиля, по-видимому, сохраняет кинематическую точность и имеет мало общего с усилием, необходимым для

создания движения [22]. В типичных экспериментах по точечному перемещению между мишенями скорость руки во времени принимала форму симметричного профиля [23]. Исходя из этого принципа, рабочего органа по направлению к рабочей зоне имеет асимметричный профиль скорости, поскольку точность и плавность особенно требуются в целевой точке. Сигнал определяется семью моментами времени ($t_1...t_7$), которые формируют его форму. Эти моменты показывают, когда ЛБК решает изменить скорость рабочего органа во время движения к цели. Момент t_4 когда ЛБК снижает скорость рабочего органа, чтобы достичь цели с максимальной точностью, разделит сигнал следующим образом:

$$(t_7 - t_4) = \beta(t_3 - t_0) \quad ; 1 \leq \beta, \quad (10)$$

где β – это рациональное число.

Основываясь на исследованиях человеческого восприятия [14, 15], предполагается, что

ЛБК может оценить величину, являющуюся первой производной наблюдаемого показателя. Это означает, что ЛБК изменяет скорость рабочего органа, но не в состоянии оценить значение ускорения в этот момент. Итак, учитывая, что ускорение в первой части управляющего сигнала является максимальным ускорением системы, то ускорение во второй части сигнала может быть определено следующим образом:

$$a(t_i) = -\frac{1}{\gamma} a(t_j) \quad ; \begin{cases} 1 \leq \gamma \\ j \in [0, 3] \\ i = j + 4 \end{cases} \quad (11)$$

где γ – это рациональное число; $a(t)$ – ускорение рабочего органа.

Коэффициенты β и γ связаны с опытом ЛБК в использовании реабилитационной системы. Чем больше их экспериментальные значения близки к идеальному значению, тем точнее позиционирование рабочего органа.

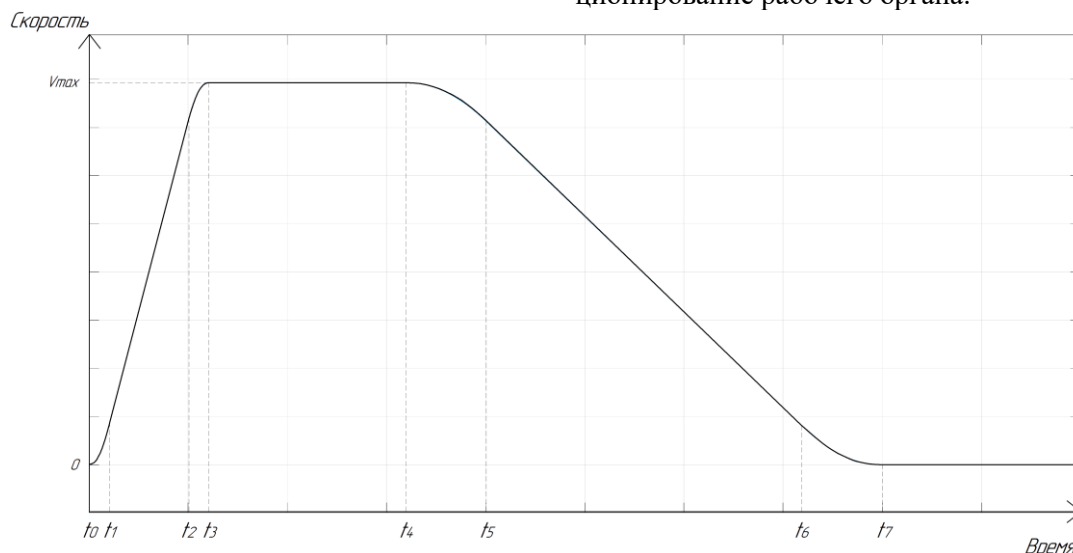


Рис. 5. Выходной сигнал модели ЛБК, асимметричный профиль управляющего сигнала скоростью рабочего органа

MATLAB моделирование и результаты. В Matlab Simulink построена модель реабилитационной системы в целях реализации предложенной стратегии управления системой «ЛБК-протез» (рис. 6). На рисунке 7 показано перемещение рабочего органа по одной оси. Определены погрешности позиционирования рабочего органа при различных типах тремора (табл. 2).

Жесткость пружины k_b (нежесткое соединение между опорами и рабочим столом) выбрана на значении 1000 Н/м . Условия идеального управляющего сигнала V_c , генерируемого пользователем для плавного движения рабочего органа на расстояния 5 мм , определяются следующим образом:

Параметры управляющего сигнала $V_c(t)$:

$$\begin{aligned} V_c(t_0 = 0) &= V_0(t_7) = 0 \\ V_c(t_3) &= V_{\max} = 1 \text{ мм.с}^{-1} \\ \frac{d}{dt}(V_c)_{\max} &= A_{\max} = 1 \text{ мм.с}^{-1} \\ \lambda &= 0.5, \beta = 4 \end{aligned}$$

Другие параметры и коэффициенты математической динамической модели, которые были использованы для моделирования: $m_a = 0,324 \text{ кг}$; $m_c = 3 \text{ кг}$; $m_b = 5 \text{ кг}$; $b_a = 5,92 \text{ Нс/м}$; $k_a = 104,8 \text{ Н/м}$; $k_s = 17 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$; двигатель постоянного тока Maxon RE 65 с редуктором $u_g = 4$; диаметр ходового винта $d = 3 \text{ мм}$ с КПД 30% и передаточное отношение механизма винт-гайка $u_m = 3770 \text{ рад/м}$; коэффициент усиления интегрирующего регулятора $K_i = 23$.

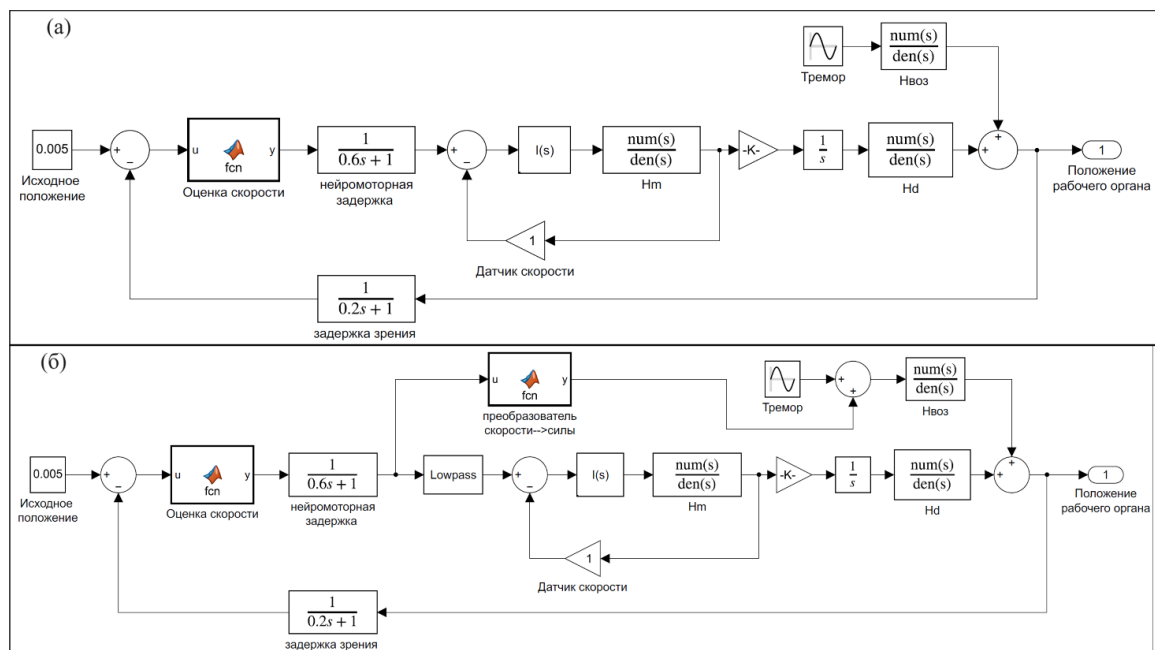


Рис. 6. Модель манипуляционной реабилитационной системы в Matlab Simulink:
а) с внешним устройством, б) с силомоментным датчиком

Таблица 2

Погрешности позиционирования рабочего органа в целевой точке

Способ форм. V_c	Первый способ (внешнее устройство)			Второй способ (силомоментный датчик)		
	Норм.	Эссенц.	Паркинс.	Норм.	Эссенц.	Паркинс.
погрешность $\Delta(X_{Поз.РО})$	$\pm 0,002$ мм	$\pm 0,02$ мм	$\pm 0,08$ мм	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,13$ мм	$\pm 0,18$ мм

В первом способе погрешность при паркинсоническом треморе в сорок раз больше, чем при нормальном. В то время как во втором способе погрешность в два раза больше. Погрешность позиционирования инструмента при нормальном треморе резко возрастает во втором способе.

На рис. 7 показано, что рабочий орган совершает колебания со значительной амплитудой при движении к целевой точке. Это вызвано произвольным движением культи, выполняемым ЛБК для формирования управляющего сигнала. Это свидетельствует о недостатке жесткого соединения культи с корпусом протеза через силомоментный датчик.

Примечательно, что и после достижения целевой точки колебания продолжают от воздействия тремора на рабочий орган. Амплитуда этого колебания определяет погрешность позиционирования рабочего органа, указанную в таблице 2.

При отсутствии предлагаемой реабилитационной системы, инструмент будет крепиться непосредственно к культе ЛБК (рис. 8). В этом случае, погрешностью позиционирования инструмента является возмущающее воздействие тремора, передающееся культе (модель Войта). Результаты приведены в таблице 3.

Сравнивая результаты таблиц 2 и 3, показано, что при использовании реабилитационной системы с силомоментным датчиком для управлять рабочего органа:

- погрешность позиционирования, вызванная нормальным тремором, уменьшилась в 4,4 раза.
- погрешность позиционирования, вызванная эссенциальным тремором, уменьшилась в 4,2 раза.
- погрешность позиционирования, вызванная паркинсоническим тремором, уменьшилась в 8,9 раза.

Заключение. В предлагаемой модели реабилитационной системы тремор культи пользователя способен вызвать резонанс в системе. Резонанс очень сильно усиливает возмущение рабочего органа. Диаграмма возмущений на рисунке 3 помогает определить приемлемое значение для пружины k_b в модели. Следует отметить, что при смене ЛБК или силомоментного датчика собственная частота реабилитационной системы изменится, поэтому диаграмму потребуется перестроить.

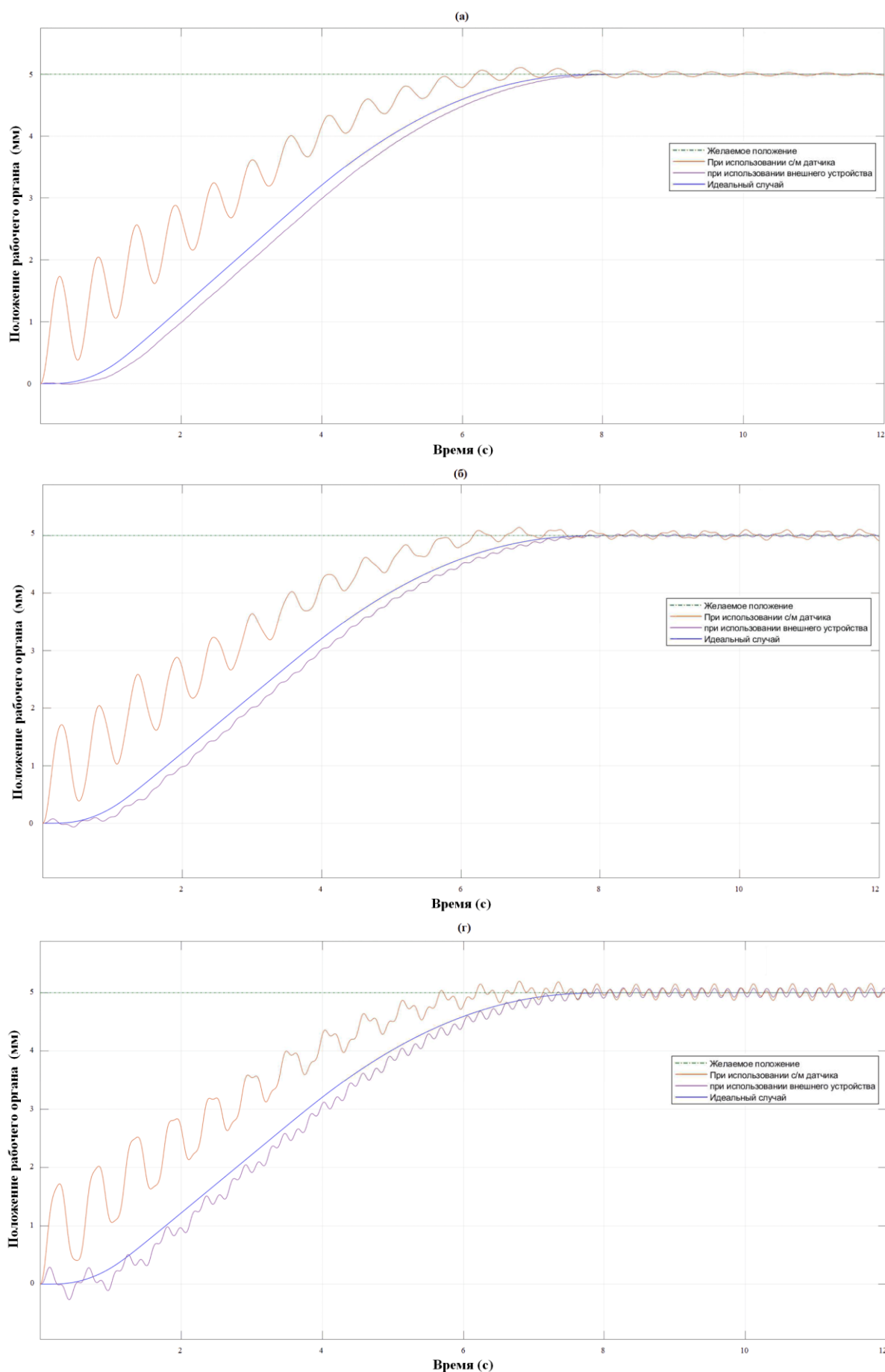


Рис. 7. Отклика системы «ЛБК-протез» на смещение рабочего органа на расстояния 5 мм с наличием тремора:
а) нормальный, б) эссенциальный, г) паркинсоновский

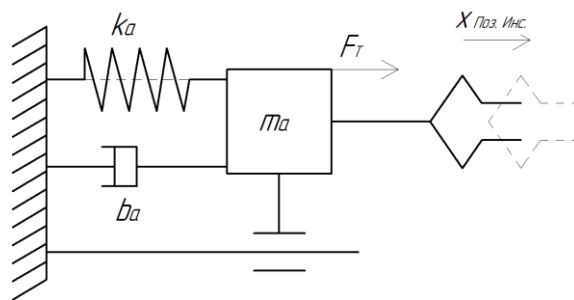


Рис. 8. Случай отсутствия предложенной системы реабилитации

Таблица 3

Погрешности позиционирования инструмента без использования реабилитационной системы

Тип тремора	Норм.	Эссенц.	Паркинс.
погрешность $\Delta(X_{\text{Поз. Инс.}})$	$\pm 0,44$ мм	$\pm 0,55$ мм	$\pm 1,61$ мм

Управление положением рабочего органа интуитивно понятным для пользователя способом показало удовлетворительные результаты. Тем не менее, необходимо дальнейшее совершенствование системы управления, чтобы свести к минимуму вибрации при перемещении рабочего органа.

Несмотря на грубое движение рабочего органа к целевой точке, погрешность позиционирования рабочего органа приемлема для выполнения высокоточных задач, таких как пайка и установка электронных схем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Marinelli A., Boccardo N., Tessari F. Active upper limb prostheses: a review on current state and upcoming breakthroughs // *Progress in Biomedical Engineering*. 2023 Vol. 5. DOI: 10.1088/2516-1091/acac57
2. Bhatia K.P., Bain P., Bajaj N., Elble R.J., Hallett M. Prosthesis rejection in individuals with limb amputation: a narrative review with respect to rehabilitation // *Rivista di Psichiatria*. 2021. Vol. 56, Iss. 4. Pp. 175–181. DOI: 10.1708/3654.36344
3. Ciancio A.L., Cordella F., Barone R., Romeo R.A., Bellingegni A.M. Control of Prosthetic Hand via the Peripheral Nervous System // *Frontiers in Neuroscience*. 2016 Vol. 10. DOI: 10.3389/fnins.2016.00116
4. Bhatia K.P., Bain P., Bajaj N., Elble R.J., Hallett M. Consensus Statement on the Classification of Tremors, From the Task Force on Tremor of the International Parkinson and Movement Disorder Society // *Movement Disorders*. 2018. Vol. 33, Iss. 1. Pp. 75–87. DOI: 10.1002/mds.27121.
5. Andrade A.O. Practical Applications in Biomedical Engineering. London: INTECH, 2013. 424 p.
6. Пат. 210950 Российская Федерация, МПК А 61 F 2/56. Электромеханический протез кисти /

А.Н. Тимофеев, С. Берро; заявитель и патентообладатель А.Н. Тимофеев. № 2021130256; заявл. 15.10.21; опублик. 13.05.22, Бюл. № 14. 11 с.

7. Пат. 217996 Российская Федерация, МПК А 61 F 2/56. Электромеханический протез кисти / А.Н. Тимофеев, С. Берро; заявитель и патентообладатель А.Н. Тимофеев. № 2022117042; заявл. 23.06.22; опублик. 28.04.23, Бюл. № 13. 20 с.

8. Timofeev A.N., Berro S.M. Rehabilitation system of human micromotor capabilities: concept and design // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2373. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022005.

9. Берро С., Тимофеев А.Н. Разработка и исследование манипуляционной реабилитационной системы // *Наука и бизнес: пути развития*. 2022. № 4. С. 183–186.

10. Puzi A.A., Sidek S.N., Sado F. Mechanical Impedance Modeling of Human Arm: A survey [// *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*], 2017. Vol. 184. DOI: 10.1088/1757-899X/184/1/012041.

11. Venkadesan M., Valero-Cuevas F.J. Effects of neuromuscular lags on controlling contact transitions // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2009. Vol. 367. Pp. 1163–1179. DOI: 10.1098/rsta.2008.0261.

12. Lakie M., Walsh E.G., Arblaster L.A., Villagra F., Roberts R.C. Limb temperature and human tremors // *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 1994. Vol. 57. Pp. 35–42. DOI: 10.1136/jnnp.57.1.35.

13. Yu Meigal A., Rissanen S.M., Tarvainen M.P., Georgiadis S.D., Karjalainen P.A., Airaksinen O., Kankaanp M. Linear and nonlinear tremor acceleration characteristics in patients with Parkinson's disease // *Physiological Measurement*. 2012. Vol. 33. Pp. 395–412. DOI: 10.1088/0967-3334/33/3/395.

14. Rotha N., Seliktarb R, Mizrahia J. Mechanical impedance control in the human arm while man-

ually transporting an open-top fluid filled dish // Applied Bionics and Biomechanics. 2011. Vol. 8. Pp. 429–440. DOI: 10.3233/ABB-2011-0035.

15. Fu M.J., Cavusoglu C.M. Human Arm-and-Hand Dynamics Model with Variability Analyses for a Stylus-based Haptic Interface // IEEE transactions systems, man, and cybernetics, part B. 2012. Vol. 42, Iss. 6. Pp. 1633–1644. DOI: 10.1109/TSMCB.2012.2197387.

16. Sperling M., Schütz A.C., Braun D.I., Gegenfurtner K.R. Keep your eyes on the ball: smooth pursuit eye movements enhance prediction of visual motion // Journal of Neurophysiology. 2011. Vol. 105, Iss. 4. Pp. 1756–1767. DOI: 10.1152/jn.00344.2010.

17. Tresilian J.R. Hitting a moving target: Perception and action in the timing of rapid interceptions // Perception & Psychophysics. 2005. Vol. 67, Iss. 1. Pp. 129–149. DOI: 10.3758/BF03195017.

18. Pola J., Wyat H.J. Offset Dynamics of Human Smooth Pursuit Eye Movements: Effects of Target Presence and Subject Attention // Vision Res. 1997. Vol. 18, Iss. 37. Pp. 2579–2595. DOI: 10.1016/S0042-6989(97)00058-8.

19. Cámara C., De la Malla C., López-Moliner J., Brenner E. Eye movements in interception with delayed visual feedback // Vision Res. 2018. Vol. 236. Pp. 1837–1847. DOI: 10.1007/s00221-018-5257-8.

20. Linford C.W., Hopkins J.T., Schulthies S.S., Frelund B., Draper D.O., Hunter I. Effects of Neuromuscular Training on the Reaction Time and Electromechanical Delay of the Peroneus Longus Muscle // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2006. Vol. 87, Iss. 3. Pp. 395–401. DOI: 10.1016/j.apmr.2005.10.027.

21. Берро С., Тимофеев А.Н. Система реабилитации микромоторных возможностей человека. Моделирование и управление одиночной степени свободы // ВЕСТНИК МГТУ «СТАНКИН». 2022. Т. 3. № 62. С. 63–73.

22. Harris C.M., Wolpert D.M. Signal-dependent noise determines motor planning // Nature. 1998. Vol. 394. Pp. 780–784. DOI: 10.1038/29528.

23. Wong J.D., Cluff T., Kuo A.D. The energetic basis for smooth human arm movements // eLife. 2021 Vol. 10. DOI: 10.7554/eLife.68013.

Информация об авторах

Берро Сомар, аспирант, ассистент высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: berro.somar@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тимофеев Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор высшей школы автоматизации и робототехники. E-mail: timofeevan@inbox.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 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 (СПбПУ). Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила 28.11.2023 г.

© Берро Сомар, Тимофеев А.Н., Кочнева О.В., 2024

***Berro S., Timofeev A.N., Kochneva O.V.**

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

**E-mail: berro.somar@gmail.com*

POSITIONING THE WORKING ORGAN OF REHABILITATION SYSTEM IN THE PRESENCE OF HUMAN STUMP TREMOR

Abstract. The problem of accurate positioning of objects using an active prosthesis hand is not widely investigated, where many factors can play a significant role in degrading of the prosthesis accuracy. An unorthodox rehabilitation system equipped with manipulator with elastic links aimed to help people without brushes in performing fine tool movements has been developed. In this system, a force/torque sensor is securing a physical hard connection between the stump and the prosthesis. In such human-prosthesis systems many factors contribute to tool positioning error, but when high accuracy is required, the human tremor in the residual stump becomes a key factor affecting the accuracy of the tool fine movements. Mathematical model of this system is developed and the error resulted by stump tremor is isolated. Depending of the force/torque sensor, two control strategies are presented in order to perform high accuracy working organ movement between two points. The first is to use the sensor to collect involuntary stump movements caused by the tremor.

The second is to use the sensor as an input for the control system by recording all stump movements. In computer simulation, the effect of three main types of human tremor on the manipulation accuracy of the rehabilitation system is observed. As a result, a positioning accuracy of 0.1 mm is achievable by meeting some design criteria that would element the resonance effect in the system.

Keywords: instrument positioning, rehabilitation system, tremor, force-moment sensor, precise movement, control system.

REFERENCES

1. Marinelli A., Boccardo N., Tessari F. Active upper limb prostheses: a review on current state and upcoming breakthroughs. *Progress in Biomedical Engineering*. 2023 Vol. 5. DOI: 10.1088/2516-1091/acac57
2. Bhatia K.P., Bain P., Bajaj N., Elble R.J., Hallett M. Prosthesis rejection in individuals with limb amputation: a narrative review with respect to rehabilitation. *Rivista di Psichiatria*. 2021. Vol. 56, Iss. 4. Pp. 175–181. DOI: 10.1708/3654.36344
3. Ciancio A.L., Cordella F., Barone R., Romeo R.A., Bellingegni A.M. Control of Prosthetic Hand via the Peripheral Nervous System [Electronic resource]. *Frontiers in Neuroscience*. 2016 Vol. 10. DOI: 10.3389/fnins.2016.00116
4. Bhatia K.P., Bain P., Bajaj N., Elble R.J., Hallett M. Consensus Statement on the Classification of Tremors, From the Task Force on Tremor of the International Parkinson and Movement Disorder Society. *Movement Disorders*. 2018. Vol. 33, Iss. 1. Pp. 75–87. DOI: 10.1002/mds.27121
5. Andrade A.O. *Practical Applications in Biomedical Engineering*. London: INTECH, 2013. 424 p.
6. Timofeev A.N., Berro S. Elektromekhanicheskij protez kisti. Patent RF, no. 210950, 2022.
7. Timofeev A.N., Berro S. Elektromekhanicheskij protez kisti. Patent RF, no. 217996, 2023.
8. Timofeev A.N., Berro S.M. Rehabilitation system of human micromotor capabilities: concept and design [Electronic resource]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2373. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022005.
9. Berro S., Timofeev A.N. Development and research of a manipulative rehabilitation system [Razrabotka i issledovaniye manipulyatsionnoy reabilitatsionnoy sistemy]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2022. No. 4 (142). Pp. 183–186. (rus)
10. Puzi A.A., Sidek S.N., Sado F. Mechanical Impedance Modeling of Human Arm: A survey [Electronic resource]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 184. DOI: 10.1088/1757-899X/184/1/012041
11. Venkadesan M., Valero-Cuevas F.J. Effects of neuromuscular lags on controlling contact transitions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2009. Vol. 367. Pp. 1163–1179. DOI: 10.1098/rsta.2008.0261
12. Lakie M., Walsh E.G., Arblaster L.A., Villa-gra F., Roberts R.C. Limb temperature and human tremors. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*. 1994. Vol. 57. Pp. 35–42. DOI: 10.1136/jnnp.57.1.35
13. Yu Meigal A., Rissanen S.M., Tarvainen M.P., Georgiadis S.D., Karjalainen P.A., Airaksinen O., Kankaanp M. Linear and nonlinear tremor acceleration characteristics in patients with Parkinson's disease. *Physiological Measurement*. 2012. Vol. 33. Pp. 395–412. DOI: 10.1088/0967-3334/33/3/395
14. Rotha N., Seliktarb R., Mizrahia J. Mechanical impedance control in the human arm while manually transporting an open-top fluid filled dish. *Applied Bionics and Biomechanics*. 2011. Vol. 8. Pp. 429–440. DOI: 10.3233/ABB-2011-0035
15. Fu M.J., Cavusoglu C.M. Human Arm-and-Hand Dynamics Model with Variability Analyses for a Stylus-based Haptic Interface. *IEEE transactions systems, man, and cybernetics, part B*. 2012. Vol. 42, Iss. 6. Pp. 1633–1644. DOI: 10.1109/TSMCB.2012.2197387
16. Spering M., Schütz A.C., Braun D.I., Gegenfurtner K.R. Keep your eyes on the ball: smooth pursuit eye movements enhance prediction of visual motion. *Journal of Neurophysiology*. 2011. Vol. 105, Iss. 4. Pp. 1756–1767. DOI: 10.1152/jn.00344.2010
17. Tresilian J.R. Hitting a moving target: Perception and action in the timing of rapid interceptions. *Perception & Psychophysics*. 2005. Vol. 67, Iss. 1. Pp. 129–149. DOI: 10.3758/BF03195017
18. Pola J., Wyat H.J. Offset Dynamics of Human Smooth Pursuit Eye Movements: Effects of Target Presence and Subject Attention. *Vision Res*. 1997. Vol. 18, Iss. 37. Pp. 2579–2595. DOI: 10.1016/S0042-6989(97)00058-8
19. Cámara C., De la Malla C., López-Moliner J., Brenner E. Eye movements in interception with delayed visual feedback. *Vision Res*. 2018. Vol. 236. Pp. 1837–1847. DOI: 10.1007/s00221-018-5257-8.
20. Linford C.W., Hopkins J.T., Schulthies S.S., Frelan B., Draper D.O., Hunter I. Effects of Neuromuscular Training on the Reaction Time and Electromechanical Delay of the Peroneus Longus Muscle. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2006. Vol. 87, Iss. 3. Pp. 395–401. DOI: 10.1016/j.apmr.2005.10.027
21. Berro S., Timofeev A.N. Rehabilitation system of human micromotor capabilities. modeling and loop shaping of single-dof [Sistema reabilitatsii

mikromotornykh vozmozhnostey cheloveka. Modelirovaniye i upravleniye odinochnoy stepeni svobody]. VESTNIK MGTU «STANKIN». 2022. Vol. 3. No. 62. Pp. 63–73. (rus)

22. Harris C.M., Wolpert D.M. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*. 1998. Vol. 394. Pp. 780–784. DOI: 10.1038/29528

23. Wong J.D., Cluff T., Kuo A.D. The energetic basis for smooth human arm movements. *eLife*. 2021 Vol. 10. DOI: 10.7554/eLife.68013

Information about the authors

Berro, Somar. Postgraduate student. E-mail: berro.somar@gmail.com. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St Petersburg, Politekhnikeskaya Ulitsa, 29.

Timofeev, Andrey N. PhD. E-mail: timofeevan@inbox.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St Petersburg, Politekhnikeskaya Ulitsa, 29.

Kochneva, Olga V. PhD. E-mail: kov_mirny@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St Petersburg, Politekhnikeskaya Ulitsa, 29.

Received 28.11.2023

Для цитирования:

Берро Сомар, Тимофеев А.Н., Кочнева О.В. Позиционирование рабочего органа манипуляционной реабилитационной системы при наличии тремора культи человека // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 106–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-106-117

For citation:

Berro S., Timofeev A.N., Kochneva O.V. Positioning the working organ of rehabilitation system in the presence of human stump tremor. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 9. Pp. 106–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-106-117

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-118-130

Загороднюк Л.Х., Богданов В.Н., Кикалишвили Е.Н., Газиев Х.Х., *Сумской Д.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: pr9nik2011@yandex.ru

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ АДСОРБИРУЮЩЕГО ГИГИЕНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА

Аннотация. Приведены результаты исследований по изучению процесса смешения по разработке основного базового состава адсорбирующего гигиенического средства для содержания животных и птиц в соответствии с санитарными нормами. Исследована возможность применения роторно-шаровой мельницы, как наиболее эффективного аппарата для помола и смешения и турбулентного смесителя, обеспечивающего высокую однородность при смешении основных ингредиентов смесей. В результате исследования процессов смешения основных ингредиентов при приготовлении адсорбирующего гигиенического средства в различных смесительных агрегатах получен эффективный базовый состав адсорбирующего гигиенического средства, включающий компоненты мел М-5, аттапульгит и синтетический аморфный диоксид кремния, полученный смешением в турбулентном смесителе и соответствующий требуемой удельной поверхности $12000 \text{ см}^2/\text{г}$, которая обеспечит необходимую сорбционную емкость и тем самым обеспечит снижение патогенной микрофлоры в местах содержания сельскохозяйственных животных и птицы. Разработанная базовая основа адсорбирующего гигиенического порошкообразного средства вследствие значительной удельной поверхности обеспечит высокую степень поглощения влаги и создаст требуемый уровень санитарно-гигиенических условий содержания животных и птиц. Создание благоприятного климата для содержания сельскохозяйственных животных и птицы позволит значительно предотвратить размножение бактерий, что повлечёт за собой значительное снижение расхода использования антибиотиков при выращивании сельскохозяйственных животных, снизит уровень неприятных запахов, обеспечит сухую окружающую среду для содержания животных и птиц.

Ключевые слова: смешение, турбулентный смеситель, роторно-шаровая мельница, мел, адсорбирующее гигиеническое средство, аттапульгит, синтетический аморфный диоксид кремния, удельная поверхность.

Введение. Важным условием при получении любого материала различного назначения является степень его однородности. Поэтому ответственным технологическим решением при создании целевых материалов является выбор смесительного оборудования и подбор его технологических режимов.

При подборе смесительного агрегата или способа смешения необходимо обеспечить:

- необходимую степень смешения (степень равномерного распределения) компонентов двух и более веществ после окончания процесса смешения;

- интенсивность процесса смешения, которая определяется продолжительностью времени, когда будет достигнут требуемый результат за минимальное время смешения, с наименьшими затратами энергетических ресурсов.

Возможности получения микро- и нанодисперсных материалов и понимание процессов тонкого диспергирования и механической активации значительно изменились с появлением высокоэнергетичных измельчающих устройств, открывая новые перспективные направления в индустрии измельчения и помола материалов самого различного назначения.

При механическом воздействии на твердые материалы наряду с дроблением происходит измельчение с увеличением их удельной поверхности, при этом происходит активизация поверхности, что приводит к увеличению химической, магнитной и электрофизической активности [1]. Положительным фактором образующихся высокодисперсных материалов является их способность к самоорганизации в самые разнообразные сложные структуры с разными функциональными свойствами, а также отмечается их способность порождать подобные себе структуры, так называемые «эффекты саморепликации». В результате протекания процессов механической активации возникают новые химические соединения и формируется объемная структура с прогнозируемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами [2].

Подбор смесителя осуществляется исходя из поставленных технологических задач и требований к определенному процессу (например, количество одновременно смешиваемых компонентов, необходимая степень смешения и т.д.) и свойствам смешиваемого материала (например, гранулометрического состава, формы частиц, абразивности ингредиентов и т.д.). Заключитель-

ный выбор смесительного агрегата для технологического процесса должен объединить эти факторы с затратами на эксплуатационные расходы и затратами на покупку, чтобы прийти к рациональному технико-экономическому решению [3–7].

Смешение сырьевых смесей может производиться двумя способами: периодически или непрерывно. При периодическом смешении все ингредиенты загружаются в смеситель и перемешиваются в течение определенного времени, пока смесь не достигнет однородной консистенции, затем выгружается. Критериями параметрами таких смесителей принимаются: продолжительность времени смешения, объем, размер, форма смесителя, условия эксплуатации и т.д. Количество смешиваемых ингредиентов может варьироваться в любом диапазоне, однако, в отличие от непрерывного перемешивания, необходимо следить за тем, чтобы загрузка смесителя осуществлялась в установленном режиме [2, 8].

Для тонкого и высокодисперсного измельчения сырьевых материалов применяется разнообразное оборудование: барабанные шаровые мельницы, планетарные мельницы, роliko-кольцевые маятниковые мельницы, струйные мельницы, роторно-шаровые, дезинтеграторы и многие другие. Несмотря на значительное многообразие помольных аппаратов, все варианты воздействия на измельчаемый материал условно разделяются на основные четыре вида: раздавливание, удар, истирание, раскалывание и их комбинаций [9]. Во время процесса помола одновременно протекают и процессы смешения, в зависимости от типа агрегата процессы смешения имеют свои особенности.

Определенный интерес представляют смесители с неподвижной смесительной камерой (лопастной, червячный, ленточный и т.д.), в которой материал смешивается посредством механического устройства [10]. В таких смесителях целесообразно смешение компонентов с близкими физико-механическими характеристиками, при этом можно получить качественные однородные смеси, исключение составляют железосодержащие компоненты, вследствие сегрегации частиц в некоторых зонах смесительной камеры. Особенностью смесителей этого типа является преобладание процесса диффузионного смешивания [11, 12]. Увеличение объемов смесителей этого типа вдвое ведет к увеличению мощности привода [6], а наличие вращающегося перемешивающего устройства внутри смесительной камеры усложняет конструкцию. Основным достоинством этих смесителей является достижение высокой однородности смесей до 85 % [13].

Специфика барабанных шаровых мельниц заключается в загрузке их мелющими шарами до 35–40 % по объему камеры, где в результате совместного соударения шаров и крупных кусков, а также взаимного истирания частиц происходит помол материала с получением высокодисперсных продуктов при относительно небольшой продолжительности помола [14, 15]. Особенности конструкции планетарных мельниц, состоящих из нескольких барабанов, установленных на одном валу, позволяют мелющим телам приобретать сложное движение при значительных ускорениях, что обуславливает интенсивное измельчение материала. Основным достоинством планетарных мельниц является высокая эффективность измельчения [16].

В последние десятилетия для помола широко применяются струйные мельницы, обеспечивая сверхтонкое измельчение материала, сообщаемое струей энергоносителя (воздуха, перегретого пара, инертного газа), подаваемого из сопел со звуковыми или сверхзвуковыми скоростями. Эти мельницы характеризуются высокой энергонапряженностью и высокой эффективностью измельчения [17].

Дезинтеграторы применяются преимущественно для помола мягких, хрупких материалов с малой абразивной способностью. Исходный материал через загрузочную воронку поступает в центральную часть одного из роторов, вращающихся в противоположных направлениях, и попадает между их пальцами. Дезинтеграторы обеспечивают высокое качество смешения [18].

Особого внимания заслуживает смешение сухих сыпучих материалов вибрационным способом. В этом случае смешение обеспечивается вследствие вибрационных импульсов, создающих хаотические столкновения частиц смешиваемого материала и последующее перемещение частиц относительно друг друга. Выбор режимов вибрационных воздействий назначается с учетом характера частиц измельчаемого материала, их размерами, плотностью компонентных частиц смеси, а также геометрическими параметрами камеры смешения [2, 8, 19]. Вибрационные смесители обеспечивают высокую степень однородности сыпучих материалов с одинаковой плотностью.

Пневматические смесители работают по замкнутому циклу, процесс смешения происходит в камере, где происходит конвективное или диффузионное смешение за счет перемешивания отдельных частиц материала в общем объеме, возможно, смешение за счет расслоения измельчаемых частиц, их сегрегации, гравитационных электростатических и инерционных и других сил

[20, 21]. Смешение в смесителях этого типа позволяет смешивать компоненты смесей с разной плотностью при обеспечении высокой гомогенности.

Для получения высокодисперсных смесей и нанопорошков перспективными являются роторно-шаровые мельницы, обладающие эффектом механохимической активации [22]. Использование этих мельниц позволяет получить высокодисперсные активные порошки с требуемыми фракциями и консистенциями. Роторно-шаровые мельницы часто используются в различных отраслях, включая горнодобывающую промышленность, химическое производство и производство строительных материалов.

Особый интерес при приготовлении высокодисперсных смесей представляют турбулентные смесители, которые в последние годы широко используются в производстве строительных материалов [23]. Достоинствами турбулентных смесителей являются простота конструкции, высокая производительность, связанная с быстрым приготовлением смеси, так, время смешения занимает от 15 до 40 секунд при обеспечении высокого качества получаемого материала за счет смешения, происходящего в 3-х плоскостных движениях [24–28].

На основании проведенного анализа современных агрегатов для высокодисперсного помола и смешения компонентов сухих смесей и имеющихся у заказчика роторно-шаровой мельницы и турбулентного смесителя были проведены исследования по получению гигиенического адсорбирующего средства.

Методология. Базовые составы гигиенического адсорбирующего средства высокой удельной поверхности получали в различных механических агрегатах. Определение удельной поверхности осуществляли на приборе ПСХ-10а, принцип действия которого основан на методе газопрооницаемости Козени и Кармана.

Материалы и оборудование. В качестве сырьевых материалов при проведении испытаний использовали две марки мела: МТД-2 (ТУ 5743-020-05346453-2008) и М-5 (ТУ 5743-020-05346453-2008) производства ОАО «Шебекинский меловой завод», которые производятся из высококачественного сырья, добываемого на собственном карьере; по химическому составу они относятся к категории высококачественного мела. Химический состав и физико-химические показатели применяемого мела приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические показатели мела МТД-2 и М-5

№ п/п	Физико-химические показатели	Нормы		Фактические	
		МТД-2	М-5	МТД-2	М-5
1	Массовая доля углекислого кальция и углекислого магния в пересчете на углекислый кальций, %, не менее	96,5	98,0	97,0	98,2
2	Массовая доля веществ, нерастворимых в соляной кислоте, %, не более	2,0	1,3	1,23	1,07
3	Массовая доля полуторных оксидов железа и алюминия, %, не более	–	0,4	–	0,35
4	Массовая доля оксида железа (III), % не более	0,25	0,15	0,11	0,09-
5	Массовая доля марганца, % не более	–	0,015	–	0,005
6	Массовая доля меди, %, не более	–	0,001	–	0,000 01
7	Массовая доля влаги, %, не более	0,3	0,20	0,18	0,17
8	Массовая доля водорастворимых веществ, %, не более	0,25	–	0,07	–
9	Суммарная удельная эффективность радионуклидов, БН/кг, не более	370	370	10	10
10	Массовая доля песка, %, не более	–	0,015	–	0,008
11	Коэффициент отражения, %, не менее	85	90	85,4	90
12	Остаток на сите с сеткой №0,045, %, не более	0,8	0,5	0,2	0,20

В качестве адсорбента при приготовлении гигиенического адсорбирующего средства использовался аттапульгит - глинопорошок марки ППБ (ТУ 08.12.22-013-04002160-2019) производства ЗАО «Керамзит». Основные показатели качества продукта приведены в таблице 2.

Для создания высокой удельной поверхности разрабатываемым базовым

составам использовали оксид кремния и синтетический аморфный диоксид кремния.

Оксид кремния (IV)- безводная кремневая кислота (SiO) с молекулярной массой - 60,08, представляющий собой белый кристаллический порошок со сростками кристаллов различной формы и размеров, нерастворимый в азотной, серной и соляной кислотах, растворим во

фтористо-водородной кислоте и в растворах щелочей. Физико-химические показатели оксида кремния (IV) соответствуют нормативным показателям (табл. 3).

Синтетический аморфный диоксид кремния представляет собой белый сыпучий порошок, основные технические характеристики приведены в табл. 4.

Таблица 2

Основные показатели качества аттапульгита

№ п/п	Наименование показателя	Норма	Фактическое значение
1	Выход глинистого раствора, не менее	16	16,2
2	Массовая доля влаги, %, от и до	16,0-25,0	19,5
3	Показатель седиментации, % не более	1,0	0
4	Содержание хлорорганических соединений, (ХОС), %	Не допускается	Не обнаружено

Таблица 3

Физико-химические характеристики оксида кремния

Наименование показателя	Норма	
	Чистый для анализа(ч.д.а.) ОКП 26 1122 0042 00	Чистый(ч.д.а.) ОКП 26 1122 0041 01
1. Массовая доля оксида кремния (IV) (SiO ₂), %, не менее	98	96
2. Массовая доля нелетучих с фтористо-водородной кислотой веществ, %, не более	0,2	0,5
3. Массовая доля потерь при прокаливании, %, не более	1,5	3,0
4. Массовая доля нитратов (NO ₃), %, не более	0,002	0,005
5. Массовая доля сульфатов (SO ₄), %, не более	0,015	Не нормируются
6. Массовая доля хлоридов (Cl), %, не более	0,001	0,005
7. Массовая доля железа (Fe), %, не более	0,002	0,005
8. Массовая доля тяжелых металлов (Pb), %, не более	0,003	0,007
9. Удельная поверхность, см ² /г	60000	

Таблица 4

Основные технические характеристики синтетического аморфного диоксида кремния

Свойства	Единицы	Показатели
Потеря при сушке (при 105 °С, 2 часа)	% макс	6
Потери при прокаливании (при 1000°С, 2 часа на безводной основе)	%	–
pH (в 20 % водном растворе)	–	6,0–7,0
Средний размер частиц, (D50)	%	5,5–7,5
SiO ₂ на безводной основе	%, мин	98
% остатка на сетке 325(мокрый рассев)	ррм, макс	0,05
Удельная поверхность	см ² /г	170000
Общее содержание тяжелых металлов (по Pb)	%/мин	15
Взаимодействие с водой	–	гидрофильный
Содержание углерода	%	4,5–7,0

Синтетический аморфный оксид кремния легко вводится в создаваемые порошки, обеспечивая их высокую диспергируемость смесям, препятствуя оседанию и слеживанию при хранении и транспортировании.

При приготовлении базовых составов адсорбирующего гигиенического средства в работе использовали различные агрегаты, лабораторную роторно-шаровую мельницу РШМ-60-7 и лабо-

раторный турбулентный смеситель С 2.0 (производитель «Вибротехник») для получения гомогенной смеси.

Роторно-шаровая мельница с принудительным охлаждением РШМ-60-7 предназначена для измельчения мелкодисперсных материалов до высокой удельной поверхности. РШМ-60-7 представляет собой конструкцию из рамы, жестко установленной на неповоротной рабочей камере в виде цилиндрической двухконтурной емкости,

электродвигателя, регулятора скорости вращения, стальных шаров, рабочего вала с активаторами мелющих тел, рабочего вала, электродвигателя (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторная роторно-шаровая мельница

Мелющие тела (стальные шары) приводятся в движение активаторами, расположенными на рабочем валу, которые в свою очередь приводятся в движение при помощи роторов. Загрузка материала производится в движение при помощи роторов. Загрузка материала производится через верхний люк цилиндрической емкости, а разгрузка осуществляется через противопожарный нижний выгрузочный люк. Разрушение частиц осуществляется при соударении, сдвиге и истирании мелющих тел. Для разгрузки и аспирации помольной камеры применяется сжатый воздух. В конструкции РШМ-60-7

предусмотрено принудительное охлаждение рабочей камеры («охлаждающая рубашка»), которое осуществляется в наружном контуре, препятствуя нагреву внутреннего контура в ходе сверхинтенсивного измельчения. Установленная мощность – 6,5 кВт, производительность – до 240 кг/ч, эффективное время измельчения одной загрузки – 15 мин.

Смеситель турбулентный С 2.0 предназначен для смешивания до однородного состояния сухих сыпучих порошков и жидкостей (рис. 2).



Рис. 2. Лабораторный смеситель турбулентный

Система управления частотой питающего напряжения позволяет регулировать частоту вращения чаши, а также время работы смесителя. Технические характеристики приведены в таблице 5.

Таблица 5

Технические характеристики турбулентного смесителя

№ п/п	Параметры, единицы измерения	Значение параметров
1	Полный/полезный объем чаши, л	2,6/1,7
2	Частота вращения чаши, об/мин	10–55
3	Напряжения питания, 50 Гц, В	220
4	Мощность мотор-редуктора, кВт	0,18
5	Габаритные размеры, мм (длина × ширина × высота)	610×525×430
6	Масса, кг	100
7	Материал чаши и крышки	AISI 304
8	Модель пульта управления	Встроенная система управления

Основная часть. Для приготовления адсорбирующего гигиенического средства (АГС) необходимо создать высокодисперсную смесь, назначение которой обеспечить высокие показатели по влагопоглощению конечного продукта, а это требует придания повышенной удельной поверхности создаваемому порошку. Учитывая, что в основную часть состава АГС входит мел (до 70 % и более), который вследствие своего генезиса, обладает высокой поглотительной способностью, представило интерес исследовать процессы смешения сырьевых компонентов в различных механических агрегатах и установить наилучший для технологического процесса.

Для разработки основного базового состава адсорбирующего гигиенического средства (АГС)

и подбора наиболее эффективного оборудования использовали два механических агрегата: роторно-шаровую мельницу, как наиболее эффективного аппарата для помола и смешения и турбулентный смеситель, обеспечивающий высокую однородность при смешении основных ингредиентов средства.

На начальном этапе работы исследовали особенности дополнительного помола мела МТД-2, имеющего начальную удельную поверхность – 5880 см²/г в роторно-шаровой мельнице и в турбулентном смесителе. При помоле мела в указанных агрегатах производили отбор проб через 3, 10 и 17 мин и определяли удельную поверхность на приборе ПСХ-10а. Результаты помола приведены в таблице 6 и рисунке 3.

Таблица 6

**Изменение удельной поверхности мела МТД-2 при помоле в роторно-шаровой мельнице
и в турбулентном смесителе**

№ п/п	Время помола, мин	Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$ при помоле	
		Роторно-шаровая мельница	Турбулентный смеситель
0	—	5880	5880
1	3	5534	5690
2	10	4472	4746
3	17	3581	3668

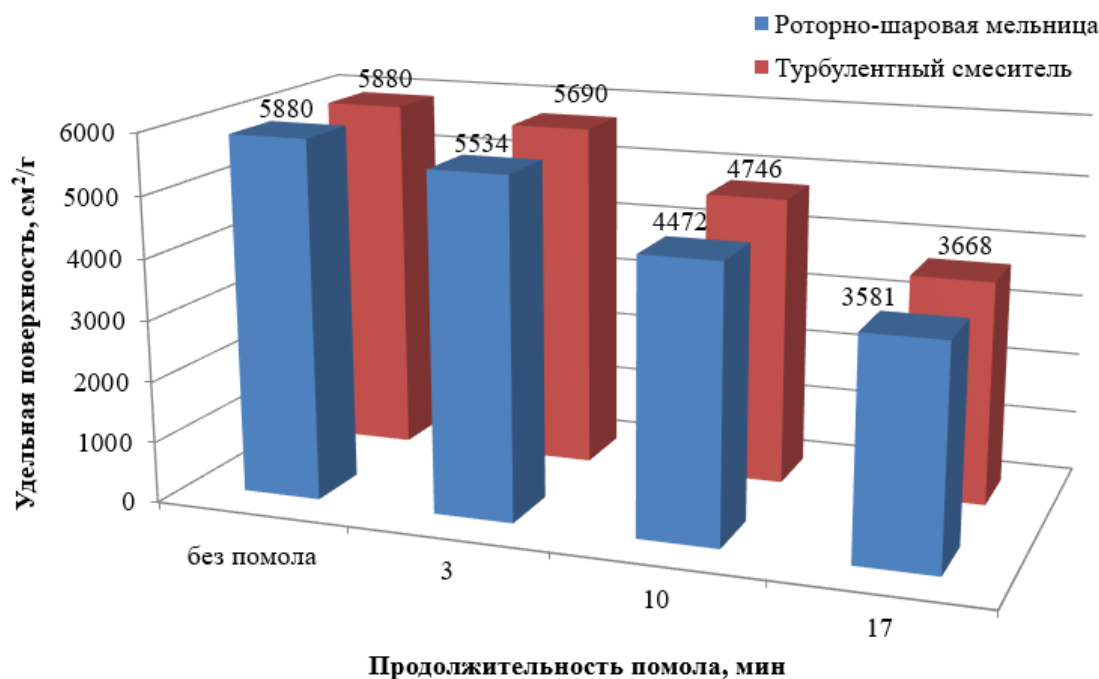


Рис. 3. Изменение удельной поверхности мела МТД-2 при помоле в роторно-шаровой мельнице
и в турбулентном смесителе

Анализ полученных результатов свидетельствует, что в рассматриваемых агрегатах с увеличением продолжительности помола мела с 3 до 17 мин наблюдается стабильное понижение удельной поверхности с $5880 \text{ см}^2/\text{г}$ до $3581 \text{ см}^2/\text{г}$ в роторно-шаровой мельнице, что составляет 39 % и до $3668 \text{ см}^2/\text{г}$ в турбулентном смесителе с повышением плотности до 38 %, что обусловлено уплотнением структуры высокодисперсного мела (рис. 3). Кроме того, отмечается, что мел измельчаемый в роторно-шаровой мельнице с увеличением продолжительности помола, изменил цвет с белого до темно-серого, что свидетельствует об увеличении намола и присадки металла от мельницы и шаров.

Установлено, что для приготовления смеси более эффективен турбулентный смеситель, т.к. способствует повышению удельной поверхности, что позволяет рекомендовать для дальнейших исследований.

Из проведенных исследований установлено, что механическая обработка чистого мела МТД-

2 в описанных агрегатах приводит к его уплотнению его структуры и снижению удельной поверхности.

Поскольку цель проведения исследований заключалась в получении высокодисперсного порошка на основе мела, требовалось в состав смеси ввести наполнитель, способствующий увеличению удельной поверхности. В качестве такого наполнителя был применен аттапульгит и были изучены составы, содержащие мел МТД-2 и М-5 (табл. 7).

Анализ кривых изменения удельных поверхностей составов, приготовленных на мелах МТД-2 и М-5 с использованием аттапульгита, свидетельствует об его эффективном влиянии на процессы смешения (рис. 4).

Так, при применении мела МТД-2 в составах (1а) с содержанием 10 % аттапульгита увеличивается удельная поверхность при продолжительности смешения от 3 до 30 мин с 10,5 % до 16,8 %. В составах с содержанием аттапульгита – 20 % (2а) удельная поверхность возрастает от 17,7 % до 26 % при продолжительности смешения с 3 мин до 30 мин. Аттапульгит в составах

(3а) в количестве 30 % при продолжительности смешения повышает удельную поверхность смеси с 15,3 % до 24,3 %. Следует отметить, что увеличение введения количества аттапульгита в

составы с мелом МТД-2 от 10 % до 30 % обеспечивает повышение удельной поверхности с 10,5 % до 26 %.

Таблица 7

Удельные поверхности составов на меле МТД-2 и М-5 с аттапульгитом при смешении в турбулентном смесителе

№ №	Состав, %		Удельная поверхность, см ² /г при времени смешения, мин				№ №	Состав, %		Удельная поверхность, см ² /г при времени смешения, мин			
	МТД-2	атта-пульгит	3	10	17	30		М-5	атта-пульгит	3	10	17	30
0а	100	—	6242	6400	6430	6391	0б	100	—	6389	6624	6811	6712
1а	90	10	6500	6700	6882	6872	1б	90	10	6561	6836	6911	6964
2а	80	20	6922	7100	7216	7413	2б	80	20	6937	7233	7397	7464
3а	70	30	6781	7163	7254	7309	3б	70	30	6742	7100	7353	7387

Использование мела М-5 в составах (1б) с содержанием аттапульгита 10 % показало увеличение удельной поверхности с увеличением времени смешения с 3 мин до 30 мин с 11,6 % до 18,4 %. В составах с содержанием аттапульгита 20 % (2б) наблюдается увеличение удельной поверхности с 18 % до 26,9 %, а при введении 30 % аттапульгита в состав (3б) удельная поверхность

возрастает с 14,6 % до 26,2 %. Обобщая полученные результаты по применению мела М-5 следует отметить, что использование мела М-5 в композиции с различным расходом аттапульгита и при различной продолжительности смешения обеспечивает получение удельной поверхности в диапазоне от 11,6 % до 26,9 %.

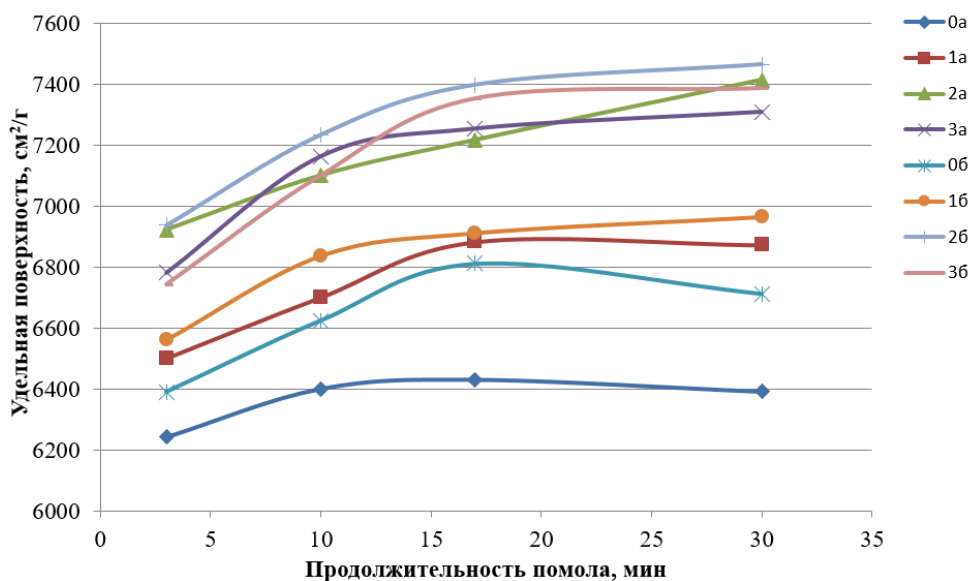


Рис. 4. Изменение удельных поверхностей составов мелов МТД-2 и М-5 с аттапульгитом при приготовлении смесей в турбулентном смесителе

Сравнивая полученные показатели по удельной поверхности смесей, приготовленных на мелах МТД-2 и М-5, можно отметить, что показатели удельных поверхностей смесей с мелом М-5 превосходят показатели с мелом МТД-2 на 7–9 %. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать для дальнейшего использования мел М-5.

Проведенными выше исследованиями было установлено, что дозировка аттапульгита в количестве 20 % в составе меловой композиции обес-

печивает при смешении в турбулентном смесителе достаточно высокую удельную поверхность. В связи с этим в последующих экспериментах принимали указанное количество аттапульгита при разработке базового состава. Для дополнительного увеличения удельной поверхности меловых базовых составов в них вводили оксид кремния и синтетический аморфный диоксид кремния (табл. 8).

Установлено, что в составах 1-1 – 1-7 (рис. 5), включающих мел М-5, аттапульгит и синте-

тический аморфный диоксид кремния, при незначительном увеличении дозировки оксида кремния значительно возрастает удельная поверхность разрабатываемых базовых меловых смесей. Так, при введении аттапульгита в количестве 2 % удельная поверхность смесей повышается на 11 %, при введении 3 % – на 17,4 %;

при введении 4 % – на 29,1 %, при 5 % – на 47,8 %; при дозировке 6 % удельная поверхность возрастает на 96,3 %, почти в два раза и при дозировке аттапульгита 10 % удельная поверхность базовой меловой смеси увеличивается на 167,5 %, т.е. в 2,7 раз.

Таблица 8

Удельные поверхности составов: мел М-5, аттапульгит и оксид кремния или синтетический аморфный диоксид кремния при смешении в турбулентном смесителе

№ №	Состав смеси, %			Уд. поверхность, см ² /г	№ №	Состав смеси, %			Уд. поверхность, см ² /г
	Мел М-5	аттапульгит	синтетический аморфный диоксид кремния			Мел М-5	аттапульгит	Оксид кремния	
1-1	80	20	–	7242	2-1	80	20	–	7119
1-2	78	20	2	8004	2-2	78	20	2	4602
1-3	77	20	3	8502	2-3	77	20	3	4748
1-4	76	20	4	9354	2-4	76	20	4	4729
1-5	75	20	5	10707	2-5	75	20	5	4647
1-6	75	18	7	14219	2-6	–	–	–	–
1-7	75	15	10	19374	2-7	–	–	–	–

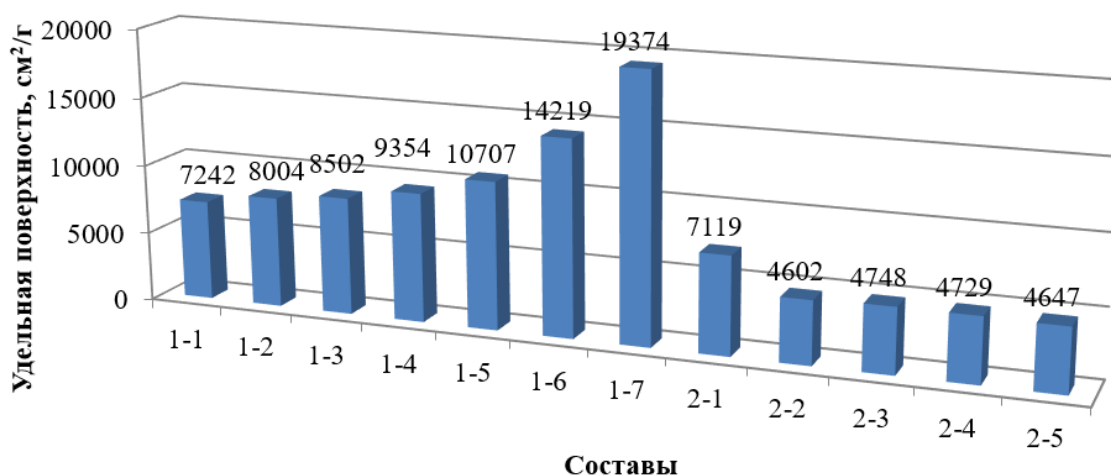


Рис. 5. Изменение удельных поверхностей составов: мел М-5, аттапульгит и оксид кремния и синтетический аморфный диоксид кремния, смешанных в турбулентном смесителе

Изучение составов 2-1 – 2-5 (рис. 5), содержащих мел М-5, аттапульгит и оксид кремния показало, что включение оксида кремния в состав меловых смесей 2 % (состав 2-2) снижает удельную поверхность на 64,6 %; при введении 3 % (состав 2-3) на 66,7 %; при введении 4 % (состав 2-4) на 66,4 % и при дозировке 5 % (состав 2-5) на 65 %. Полученные результаты свидетельствуют о неэффективности действия оксида кремния для использования для понижения удельной поверхности базовых меловых составов.

Выводы. Таким образом, на основании проведенных исследований получен эффективный базовый состав адсорбирующего гигиенического средства, включающий компоненты мел М-5, аттапульгит и синтетический аморфный диоксид кремния, полученный смешением в турбулентном смесителе и соответствующий заявленной

удельной поверхности 12000 см²/г, которая обеспечит требуемую сорбционную емкость, тем самым обеспечит снижение патогенной микрофлоры в местах содержания сельскохозяйственных животных и птицы.

Заключение. Разработанная базовая основа адсорбирующего гигиенического порошкообразного средства вследствие значительной удельной поверхности обеспечит высокую степень поглощения влаги и создаст требуемый уровень санитарно-гигиенических условий содержания животных и птиц. Создание благоприятного климата для содержания сельскохозяйственных животных и птицы позволит значительно предотвратить размножение бактерии, что повлечёт за собой значительное снижение расхода использования антибиотиков при выращивании сельско-

хозяйственных животных, снизит уровень неприятных запахов, обеспечит сухую окружающую среду.

Источник финансирования. Исследования выполнены в соответствии с Соглашением № 6-С от 13.11.2023. Грант «Инновационные решения в АПК Белгородской области, тема «Производство адсорбирующего гигиенического средства с дезинфицирующим эффектом при содержании сельскохозяйственных животных и птицы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шкарин А.В., Загороднюк Л.Х., Щекина А.Ю., Лугинина И.Г. Получение композиционных вяжущих в различных помольных агрегатах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №9. С. 89–92.
2. Фадин Ю.М., Шеметова О.М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №12. С. 145–150. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-145-150
3. Анциферов С.И., Пахотин Е.Г. Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей // В сб.: Образование, наука, производство. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 1402–1405.
4. Баренцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. Процессы смешения сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчёт. Иваново: Изд-во ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2008. 116 с.
5. Белецкий Б.Ф., Булгакова И.Г.. Строительные машины и оборудование: справочное пособие: 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. 608 с.
6. Несмеянов Н.П., Горшков П.С.. Смесители для производства ССС // Межвузовский сборник статей: Энергосберегающие строительные комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. С. 176–179.
7. Орехова Т.Н., Уваров В.А. Анализ конструкций пневмосмесителей для производства сухих строительных смесей // Интерстроймех 2010: сб. докл. Междунар. научн-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2010. С. 92–94.
8. Шеметова О.М., Шеметов Е.Г. Анализ технических средств для смешения сухих строительных смесей // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. С. 3012–3015.
9. Витязь П.А., Николайчик Ю.А., Ровин С. Л., Свидунович Н. А., Куис Д. В. Оборудование и технологии получения и использования наноструктурированных материалов // Литье и металлургия. 2021. №1. С. 137–141. DOI: 10.21122/1683-6065-2021-1-137-141
10. Верлока И.И., Капанова А.Б., Лебедев А.Е. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов // Инженерный вестник Дона. Электронный журнал. 2014. №4. С. 46.
11. Капанова А.Б., Верлока И.И., Яковлев П.А., Филиппов С.В. К расчету объемной доли сыпучего компонента при порционном смешивании в гравитационном устройстве // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов 30-й Междунар. науч. конф. в 12 т. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. Т. 9. С. 64–66.
12. Капанова А.Б., Бакин М.Н., Лебедев А.Е., Зайцев А.И. Исследование ударного смешивания твердых дисперсных сред при вторичных столкновениях частиц // Известия ВУЗов. Химия и хим. технология. 2013. Т. 56. №6. С. 83–86.
13. Чемеричко Г.И., Анциферов С.И., Пахотин Е.Г. Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей // В сб.: Образование, наука, производство. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. С. 1585–1588.
14. Иванов С.Д., Кудряшов А.Н., Ощепков В.В. Определение оптимальной производительности шаровой барабанной мельницы при размоле бурых углей // Теплоэнергетика. 2021. №2. С. 61–67. DOI: 10.1134/S0040363621010136
15. Першин В.Ф., Свиридов М.М. Конструирование смесителей сыпучих материалов, обеспечивающих стабильный уровень качества смеси // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1999. №8. С. 13–15.
16. Хвесько Г.М., Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. Динамическая модель горизонтальной планетарной мельницы // Механика машин, механизмов и материалов. 2022. №2 (59). С. 31–38.
17. Постникова И.В., Блиничев В.Н. Струйные мельницы // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2015. №2. С. 144–151.
18. Богданов В.С., Семикопенко И.А., Масловская А.Н., Пензев П.П. Дезинтегратор с узлом высокоскоростной подачи измельчаемого материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №1. С. 101–103.
19. Еренков О.Ю., Богачев А.П. Оборудование механических процессов в химической технологии. Издательство: ТОГУ, Хабаровск, 2014.
20. Захарова Е.Б., Одинокий М.И. Оборудование для производства модифицированных сухих строительных смесей // Строительные материалы. 2005. №9. С. 58–59.

21. Балагуров И.А., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов // Вестник ИГЭУ. 2014. Вып. 6. С. 67–70.

22. Денисов Г.А. Производство и использования сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2011. №1. С. 14–18.

23. Моргун Л.В., Нагорский В.В. Турбулентные смесители в технологии пенобетонов // В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. Курск, 2021. С. 31–36.

24. Моргун Л.В., Нагорский В.В., Моргун В.Н. Об изготовлении пенобетонных смесей в смесителях турбулентного типа // В сборнике: Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития. Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Отв. Редактор Д.Ю. Карандеев. Абакан, 2021. С. 57–60.

25. Халюшев А.К., Калатурская Т.А., Ельшанова Д.М., Доценко Н.А., Самофалова М.С. Методика расчета рациональных геометрических параметров и режимов работы турбулентного смесителя для эффективного приготовления пенобетонной смеси // Вестник ВСГУТУ. 2021. №3 (82). С. 46–53.

26. Нагорский В.В., Моргун Л.В., Богатина А.Ю. Эксплуатационные достоинства применения турбулентных смесителей в технологии пенобетонов // Химия, физика и механика материалов. 2019. №1 (20). С. 14–24.

27. Белова Т.К. Приготовление в турбулентном смесителе цементного раствора, дисперсно-армированного модифицированной микрофиброй // Вестник МГСУ. 2016. №3. С. 47–58.

28. Пузырев А.А. Влияние турбулентного перемешивания на свойства связующего // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2013. №3 (31). С. 41–45.

Информация об авторах

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

Богданов Всеволод Николаевич, ведущий специалист ЦТИТ. E-mail: bogdanov_vsevolod@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кикалишвили Елена Нурисламовна, аспирант. E-mail: li_ki10@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Газиев Хумоюнбек Хайдаралиевич, магистрант. E-mail: humoyunbek1998@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

Поступила 18.02.2024 г.

© Загороднюк Л.Х., Богданов В.Н., Кикалишвили Е.Н., Газиев Х.Х., Сумской Д.А., 2024

Zagorodnyuk L.Kh., Bogdanov V.N., Kikalishvili E.N., Gaziev Kh.Kh., *Sumskoy D.A.

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

**E-mail: pr9nik2011@yandex.ru*

STUDYING THE PROCESS OF MIXING THE MAIN COMPONENTS OF AN ADSORBENT HYGIENIC PRODUCTS

Abstract. The results of research on the study of the mixing process to develop the basic composition of an adsorbent hygienic product for keeping animals and birds in accordance with sanitary standards are presented. The possibility of using a rotary ball mill as the most effective apparatus for grinding and mixing and a turbulent mixer, ensuring high homogeneity when mixing the main ingredients of mixtures, is investigated. In result of studying the processes of mixing the main ingredients in the preparation of an adsorbent hygiene product in various mixing units, an effective basic composition of an adsorbent hygiene product is obtained. Moreover, the components chalk M-5, attapulgite and synthetic amorphous silicon dioxide, obtained by mixing

in a turbulent mixer and corresponding to the required specific surface area of 12000 cm²/g, which will provide the necessary sorption capacity and thereby ensure a reduction in pathogenic microflora in places where farm animals and poultry are kept. The developed basis of an adsorbent hygienic powder product, due to its significant specific surface area, will provide a high degree of moisture absorption and create the required level of sanitary and hygienic conditions for keeping animals and birds. Creating a favorable climate for keeping farm animals and poultry will significantly prevent the proliferation of bacteria, which will entail a significant reduction in the consumption of antibiotics when raising farm animals, reduce the level of unpleasant odors, and provide a dry environment for keeping animals and birds.

Keywords: *mixing, turbulent mixer, rotary ball mill, chalk, adsorbent hygiene product, attapulgit, synthetic amorphous silicon dioxide, specific surface area.*

REFERENCES

1. Shkarin A.V., Zagorodnyuk L.Kh., Shchekina A.Yu., Luginina I.G. Preparation of composite binders in various grinding units [Poluchenie kompozitsionnykh vyazhushchikh v razlichnykh pomolnykh agregatakh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhova. 2012. No. 9. Pp. 89–92. (rus)
2. Fadin Yu.M., Shemetova O.M. Dry building mixtures and mixing equipment for their production [Sukhie stroitelnye smesi i smesitelnoe oborudovanie dlya ikh proizvodstva]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhova. 2020. No. 12. Pp. 145–150. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-145-150. (rus)
3. Antsiferov S.I., Pakhotin E.G. Analysis of the modern market of equipment for the production of dry building mixtures [Analiz sovremennogo rynka oborudovaniya dlya proizvodstva sukhikh stroitelnykh smesey]. In: Education, science, production. Belgorod: Publishing house BSTU named after V.G. Shukhova, 2015. Pp. 1402–1405. (rus)
4. Barentseva E.A., Mizonov V.E., Khokhlova Yu.V. Processes of mixing bulk materials: modeling, optimization, calculation [Protsessy smesheniya sypuchikh materialov: modelirovanie, optimizatsiya, raschet]. Ivanovo: Publishing house of ISUE named after named after Lenina, 2008. 116 p.
5. Beletsky B.F., Bulgakov I.G. Construction machines and equipment [Stroitelnye mashiny i oborudovanie]: reference manual: 2nd ed., revised. and additional – Rostov n/d: Phoenix, 2005. 608 p. (rus)
6. Nesmeyanov N.P., Gorshkov P.S.. Mixers for the production of SSS [Smesiteli dlya proizvodstva SSS]. Interuniversity collection of articles: Energy-saving construction complexes and equipment for the production of building materials. Belgorod: Publishing house BSTU named after V.G. Shukhova, 2009. Pp. 176–179. (rus)
7. Orekhova T.N., Uvarov V.A. Analysis of pneumatic mixer designs for the production of dry building mixtures [Analiz konstruktsiy pnevmosmesiteley dlya proizvodstva sukhikh stroitelnykh smesey]. Interstroyekh 2010: collection. report Intl. scientific-practical conf. Belgorod: Publishing house BSTU named after V.G. Shukhova, 2010. Pp. 92–94. (rus)
8. Shemetova O.M., Shemetov E.G. Analysis of technical means for mixing dry building mixtures [Analiz tekhnicheskikh sredstv dlya smesheniya sukhikh stroitelnykh smesey]. In: International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhova. Belgorod: Publishing house BSTU named after V.G. Shukhova, 2020. Pp. 3012–3015. (rus)
9. Vityaz P.A., Nikolaychik Yu.A., Rovin S.L., Svidunovich N.A., Kuis D.V. Equipment and technologies for the production and use of nanostructured materials [Oborudovanie i tekhnologii ipolucheniya i ispolzovaniya nanostrukturirovannykh materialov]. Casting and metallurgy. 2021. No. 1. Pp. 137–141. DOI: 10.21122/1683-6065-2021-1-137-141. (rus)
10. Verloca I.I., Kapranova A.B., Lebedev A.E. Modern continuous gravitational devices for mixing bulk components [Sovremennye gravitatsionnye ustroystva nepreryvnogo deystviya dlya smeshivaniya sypuchikh komponentov]. Engineering Bulletin of the Don. Electronic journal. 2014. No. 4. 46. (rus)
11. Kapranova A.B., Verloca I.I., Yakovlev P.A., Filippov S.V. Towards the calculation of the volume fraction of a bulk component during batch mixing in a gravitational device [K raschetu obemnoy doli sypuchego komponenta pri portsiionnom smeshivanii v gravitatsionnom ustroystve]. Mathematical methods in engineering and technology. Sat. Proceedings of the 30th Int. scientific conf. in 12 volumes. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2017. Vol. 9. Pp. 64–66. (rus)
12. Kapranova A.B., Bakin M.N., Lebedev A.E., Zaitsev A.I. Study of impact mixing of solid dispersed media during secondary collisions of particles [Issledovanie udarnogo smeshivaniya tverdykh dispersnykh sred pri vtorichnykh stolknoveniyakh chastits]. Izvestiya VUZov. Chemistry and chem. technology. 2013. Vol. 56. No 6. P. 83–86. (rus)
13. Chemerichko G.I., Antsiferov S.I., Pakhotin E.G. Analysis of the modern market of equipment for the production of dry building mixtures [Analiz sovremennogo rynka oborudovaniya dly proizvodstva sukhikh stroitelnykh smesey]. In: Education, science, production. Belgorod: Publishing house BSTU named after V.G. Shukhova. 2015. Pp. 1585–1588. (rus)

14. Ivanov S.D., Kudryashov A.N., Oshchepkov V.V. Determination of the optimal performance of a ball drum mill when grinding brown coals [Opredelenie optimalnoy proizvoditelnosti sharovoy barabannoy melnitsy pri razmole burykh ugley]. Thermal power engineering. 2021. No. 2. Pp. 61–67. DOI: 10.1134/S0040363621010136. (rus)
15. Pershin V.F., Sviridov M.M. Design of bulk materials mixers that provide a stable level of mixture quality [Konstruirovaniye smesiteley sypuchikh materialov, obespechivayushchikh stabilnyy yuroven kachestva smesi]. Chemical and oil and gas engineering. 1999. No. 8. Pp. 13–15. (rus)
16. Khvesko G.M., Vaitekhovich P.E., Borovsky D.N. Dynamic model of a horizontal planetary mill [Dinamicheskaya model gorizontальной planetarnoy melnitsy]. Mechanics of machines, mechanisms and materials. 2022. No. 2 (59). Pp. 31–38. (rus)
17. Postnikova I.V., Blinichev V.N. Jet mills [Struynnye melnitsy]. Modern high technology. Regional application. 2015. No. 2. Pp. 144–151. (rus)
18. Bogdanov V.S., Semikopenko I.A., Maslovskaya A.N., Penzev P.P. Disintegrator with a high-speed supply unit for crushed material [Dezintegrator s uzlom vysokoskorostnoypodachi izmelchaemogo materiala]. Vestnik BSTU named after V.G. Shukhova. 2009. No. 1. Pp. 101–103. (rus)
19. Erenkov O.Yu., Bogachev A.P. Equipment for mechanical processes in chemical technology [Oborudovaniye mekhanicheskikh protsessov v khimicheskoy tekhnologii]. Publisher: TOGU, Khabarovsk, 2014. (rus)
20. Zakharova E.B., Odinoky M.I. Equipment for the production of modified dry building mixtures [Oborudovaniye dlya proizvodstva modifitsirovannykh sukhikh stroitelnykh smesey]. Construction materials. 2005. No. 9. Pp. 58–59. (rus)
21. Balagurov I.A., Mizonov V.E. Modeling the kinetics of mixing dissimilar bulk materials [Modelirovaniye kinetiki smeshivaniya raznorodnykh sypuchikh materialov]. Bulletin of ISUE. 2014. Vol. 6. Pp. 67–70. (rus)
22. Denisov G.A. Production and use of dry construction mixtures [Proizvodstvo i ispolzovaniya sukhikh stroitelnykh smesey]. Dry construction mixtures. 2011. No 1. Pp. 14–18. (rus)
23. Morgun L.V., Nagorsky V.V. Turbulent mixers in foam concrete technology [Turbulentnye smesiteli v tekhnologii penobetonov]. In the collection: Safety of the Russian building stock. Problems and solutions. Materials of International Academic Readings. Kursk State University. Kursk, 2021. Pp. 31–36. (rus)
24. Morgun L.V., Nagorsky V.V., Morgun V.N. On the production of foam concrete mixtures in turbulent type mixers [Ob izgotovlenii penobetonnykh smesey v smesitelyakh turbulentnogo tipa]. In the collection: Engineering technologies: traditions, innovations, development vectors. Collection of materials of the VII All-Russian scientific and practical conference with international participation. Rep. Editor D.Yu. Karandeev. Abakan, 2021. Pp. 57–60. (rus)
25. Khalyushev A.K., Kalaturskaya T.A., Elshaeva D.M., Dotsenko N.A., Samofalova M.S. Methodology for calculating rational geometric parameters and operating modes of a turbulent mixer for the effective preparation of foam concrete mixture [Metodika rascheta ratsionalnykh geometricheskikh parametrov i rezhimov raboty turbulentnogo smesitelyadlya effektivnogo prigotovleniya penobetonnoy smesi]. VSGUTU Bulletin. 2021. No. 3 (82). Pp. 46–53. (rus)
26. Nagorsky V.V., Morgun L.V., Bogatina A.Yu. Operational advantages of using turbulent mixers in foam concrete technology [Ekspluatatsionnye dostoinstva primeneniya turbulentnykh smesiteley v tekhnologii penobetonov]. Chemistry, physics and mechanics of materials. 2019. No. 1 (20). Pp. 14–24.
27. Belova T.K. Preparation of cement mortar dispersedly reinforced with modified microfiber in a turbulent mixer [Prigotovlenie v turbulentnom smesitele tsementnogo rastvora, dispersno-armirovannogo modifitsirovannom mikro fibroy]. Bulletin of MGSU. 2016. No 3. Pp. 47–58. (rus)
28. Puzyrev A.A. The influence of turbulent mixing on the properties of the binder [Vliyanie turbulentnogo peremeshivaniya na svoystva svyazuyushchego]. Scientific bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture. 2013. No. 3 (31). Pp. 41–45. (rus)

Information about the authors

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

Bogdanov, Vsevolod N. Leading specialist of CTIT. E-mail: bogdanov_vsevolod@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kikalishvili, Elena N. Graduate student. E-mail: li_ki10@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Gaziev, Khumoyunbek Kh. Master's student. E-mail: xumoyunbek1998@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Received 18.02.2024

Для цитирования:

Загороднюк Л.Х., Богданов В.Н., Кикалишвили Е.Н., Газиев Х.Х., Сумской Д.А. Изучение процесса смешения основных компонентов адсорбирующего гигиенического средства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 118–130. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-118-130

For citation:

Zagorodnyuk L.Kh., Bogdanov V.N., Kikalishvili E.N., Gaziev Kh.Kh., Sumskoy D.A. Studying the process of mixing the main components of an adsorbent hygienic products. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 118–130. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-118-130

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-140

^{1,*}Ханин С.И., ¹Малахов М.А., ²Мордовская О.С., ¹Анциферов С.И.¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: dh@intbel.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ГРОХОЧЕНИЯ НА ВИБРАЦИОННОМ ГРОХОТЕ С СОСТАВНОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ ШПАЛЬТОВОГО СИТА

Аннотация. Грохоты, в основу работы которых положен принцип вибрационного воздействия просеивающей поверхности на обрабатываемый материал, обеспечивают требуемую эффективность его разделения и высокую производительность, что делает их незаменимыми в различных отраслях, включая горнодобывающую, строительных материалов и многие другие. Рассмотрены основные направления совершенствования вибрационных грохотов. Показаны преимущества шпальтовых сит различных конструкций и их недостатки, свидетельствующие о необходимости поиска решений, обеспечивающих повышение качества производимого на них продукта грохочения. Приведено описание разработанной составной конструкции шпальтового сита и обусловленных его конструктивным исполнением преимущественных особенностей реализуемого двухстадийного процесса разделения частиц материала по размерам. Обоснована целесообразность проведения экспериментальных исследований, направленных на исследование процесса грохочения сухих сыпучих материалов в вибрационном грохоте со шпальтовым ситом разработанной конструкции, позволяющей эффективно выделять «затрудняющие» частицы. В программном продукте Altair EDEM проведено, на моделях составной конструкции шпальтового сита и его прототипа, имитационное моделирование процесса грохочения с использованием метода математического планирования эксперимента. Для составной конструкции шпальтового сита получена регрессионная зависимость эффективности процесса грохочения от амплитуды колебаний сита, ширины щелей первой просеивающей поверхности и массы подаваемого материала, выполнено ее исследование. Установлено влияние рассматриваемых факторов на значения функции, определены их рациональные значения. Проведено сравнение показателей эффективности грохочения разработанной конструкции шпальтового сита с её прототипом.

Ключевые слова: вибрационный грохот, эффективность грохочения, «затрудняющие» зерна, шпальтовое сито, имитационное моделирование.

Введение. Вибрационные грохоты являются ключевым элементом современных промышленных технологических комплексов, предназначенных для разделения сыпучих материалов на фракции с соответствующими технологическим требованиям размерами частиц [1–5]. Эти машины, в основу работы которых положен принцип вибрационного воздействия просеивающей поверхности на обрабатываемый материал, обеспечивают требуемую эффективность его разделения и высокую производительность, что делает их незаменимыми в различных отраслях, включая горнодобывающую, строительных материалов и многие другие. В качестве основных направлений конструктивно-технологического совершенствования вибрационных грохотов рассматриваются ориентированные на увеличение продолжительности эксплуатации классифицирующих поверхностей и виброприводов, уменьшение величины передающихся на фундаменты вибрационных колебаний, повышение качества разделения продуктов грохочения. В свою очередь, каждое из указанных направлений характе-

ризуется различными подходами к его реализации. Так, повышение эффективности классификации может обеспечиваться изменением формы вибрационных колебаний, их направлением относительно просеивающей поверхности, рациональным сочетанием амплитуды и частоты, конструктивным исполнением просеивающей поверхности и ее положением по отношению к горизонтальной плоскости. Одним из конструктивных элементов вибрационных грохотов, наиболее влияющих на эффективность грохочения, является колосниковая решетка, а в случае разделения зернистых материалов – сито [2, 4–6]. Существенное значение при реализации процесса разделения частиц по их размерам имеет конструктивное исполнение поверхности просеивающей поверхности, непосредственно взаимодействующей с частицами материала. Просеивающие поверхности могут иметь различную форму и размеры отверстий, что позволяет адаптировать процесс грохочения под конкретные технологические требования к разделению материалов. К большой группе просеивающих поверхностей относятся шпальтовые сита различных конструкций.

Сварные шпальтовые сита выполняются расположенными параллельно и с зазором по отношению друг к другу колосниками, состоящими из головок, продолженных ножками. Головки колосников образуют щелевые отверстия шириной l , которая определяет размер частиц подрешетного материала. Ножки колосников жестко прикрепляются к перпендикулярно расположенным по отношению к ним перемышкам. Основные преимущества шпальтовых сит включают высокую точность ширины щели, снижение «засоряемости» просеивающей поверхности, повышенную износоустойчивость и жесткость конструкции. К недостаткам данных сит относят наличие включений с лещадной формой частиц в подрешетном продукте, а также значительное негативное влияние «затрудняющих» зерен на процесс грохочения, что приводит к снижению эффективности процесса грохочения вследствие перекрытия «затрудняющими» зернами части живого сечения просеивающей поверхности [2]. Рассмотренные преимущества шпальтовых сит и наличие указанных недостатков свидетельствуют о необходимости поиска решений, обеспечивающих повышение качества, производимого на них продукта грохочения.

В результате анализа особенностей конструкций грохотов и процесса разделения на них зернистых материалов, разработана составная конструкция шпальтового сита, приведенная в [7]. В этой конструкции ножка каждого колосника продолжена перпендикулярно расположенной, по отношению к ней, полкой (рис. 1). Полки жестко соединены перемышками со сторон, противоположных прикрепленным к ножкам. Полки соседних колосников образуют щелевые отверстия, имеющие равную ширину l_n и криволинейную форму щели. Ножки каждого из колосников имеют сквозные отверстия, продольные оси ко-

торых направлены поперек колосника. Эти отверстия сопрягаются с полками. При этом должна обеспечиваться определенная взаимосвязь размеров ширины b промежутка между ножками соседних колосников, ширины l_n и ширины l . Эти размеры связаны неравенствами: $l_n < l < l_n/0,75$ и $b > l/0,75$. Конструкция сита имеет первую просеивающую поверхность, образованную головками колосников и промежутками между ними в виде щелевых отверстий шириной l , и расположенную под ней вторую просеивающую поверхность, образованную сопрягаемыми с ножками поверхностями полок и щелевыми отверстиями шириной l_n . Поэтому процесс разделения частиц материала по размерам является двухстадийным. В научной литературе частицы размером, превышающим $l_n/0,75$, относят к «затрудняющим» процесс грохочения на просеивающей поверхности с шириной отверстий l_n [2, 4]. Так как для второй просеивающей поверхности рассматриваемой конструкции сита, с шириной отверстий l_n , частицы размером, превышающим $l_n/0,75$, являются «затрудняющими» процесс грохочения, то они эффективно выделяются на первой стадии первой просеивающей поверхностью. Частицы с размерами менее $l_n/0,75$ являются «легкогрохотимыми» через отверстия шириной l . На второй стадии процесса разделение материала, лишённого частиц с размерами, превышающими $l_n/0,75$, эффективно осуществляется через отверстия с шириной отверстий l_n второй просеивающей поверхности. Кроме того, криволинейная форма щелевых отверстий второй просеивающей поверхности создает условия переориентации направлений движений частиц материала по просеивающей поверхности, что способствует более эффективному их выделению в сравнении с прямолинейной формой, а также снижает вероятность попадания в нижний класс частиц лещадной формы.

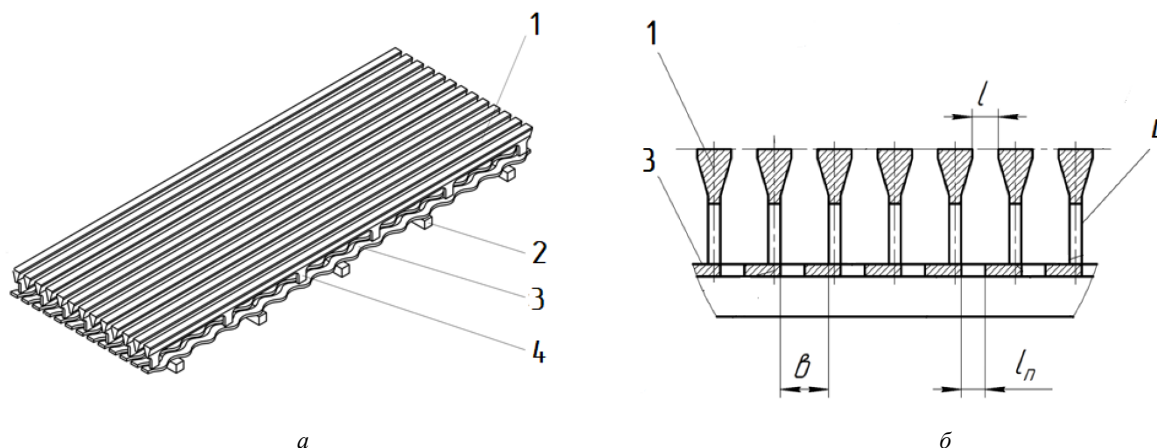


Рис. 1. Составное шпальтовое сито:
 а – цифровая модель, б – фрагмент поперечного сечения:
 1 – головка колосника; 2 – поперечина; 3 – полка; 4 – ножка колосника

В научной литературе предлагается достаточно большое количество математических описаний процесса разделения материала по размерам частиц на просеивающих поверхностях, которые отличаются как по подходам к описанию, так и степени приближения к реальному процессу грохочения на физической модели [5-6, 8-10]. Вместе тем, в них недостаточно внимания уделено описанию влияния «затрудняющих» частиц на рассматриваемый процесс. В этой связи возникает необходимость в разработке соответствующего математического описания, подтверждения его адекватности, а также сравнения эффективности процессов сухого грохочения на рассмотренной конструкции шпальтового сита и его прототипе. На начальной стадии проведения исследования рациональным является использование известных программных продуктов, обеспечивающих имитационное моделирование этого процесса [11–15].

1. Материалы и методы. В результате анализа применяемых в этих целях программных продуктов выбор остановлен на Altair EDEM [16]. Для симуляции использовались уменьшенные цифровые модели горизонтального вибрационного грохота с составной конструкцией шпальтового сита и её прототипом, выполненные в программной среде КОМПАС-3D. Коэффициент геометрического подобия физического прототипа грохота ВГЛ-830 и цифровых моделей, определяемый как соотношение их линейных размеров, составлял $k_r=10$. Производительность грохота по исходному питанию – $Q_{ф.пр}=200..22000$ кг/ч; просеивающая поверхность характеризуется длиной $L_{ф.пр}=3$ м, шириной $H_{ф.пр}=1$ м, размерами ячеек – $l_{ф.пр}=0,5..200$ мм. Просеивающие поверхности сит цифровых моделей грохота с составной конструкцией сита и прототипа характеризовались длинами $L_c=L_{пр}=0,3$ м и ширинами $H_c=H_{пр}=0,1$ м. Размеры

цифровых моделей, количество загружаемых частиц ограничивались ресурсами ПК. При построении цифровых моделей использовались размеры колосников шпальтового сита распространенного типа 3 с шириной щели 1,4 мм (ГОСТ 9074-85. Сетки щелевые на соединительных шпильках. М., 1987. 67 с. Государственный комитет СССР по стандартам). «Живое сечение» первой просеивающей поверхности составного сита составляло $\phi_{с1}=30,0-34,8$ %, второй – $\phi_{с2}=26,8$ %. Назначалась частота его колебаний – $n=21,2$ с⁻¹. «Живое сечение» просеивающей поверхности сита прототипа составляло $\phi_{п}=28,6$ %. Ширина щелей второй просеивающей поверхности составного сита и просеивающей поверхности сита прототипа составляла 1,4 мм. Материалу задавались свойства кварцевого сухого песка. Продолжительность симуляции определялась полным прохождением порции песка по просеивающим поверхностям и не превышала 5 с, для чего требовалось 12-16 часов машинного времени. По условию проведения экспериментов на сито грохота подавалась одна порция материала массой m . Для исследования процесса грохочения на модели вибрационного грохота со шпальтовым ситом был использован метод математического планирования эксперимента по плану ЦКРП-2³ [17]. В качестве исследуемой функции принята выраженная в процентах эффективность грохочения [18]:

$$E = \frac{\alpha - \vartheta}{\alpha(100 - \vartheta)} \cdot 10^4, \quad (1)$$

где содержание нижнего класса: α – в исходном материале, %; ϑ – в надрешетном продукте, %.

За варьируемые факторы приняты: амплитуда колебаний a , мм; ширина щели первой просеивающей поверхности l , мм; масса порции классифицируемого материала m , г. Уровни их варьирования приведены в табл.1.

Таблица 1

Факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКРП-2³

Факторы	Обозначение		Интервал	Уровни варьирования факторов				
	Кодированный вид	Натуральный вид		-1,68	-1	0	+1	+1,68
Амплитуда колебаний сита	X_1	a , мм	1,19	2,0	2,81	4,0	5,19	6,0
Ширина щели первой просеивающей поверхности	X_2	l , мм	0,18	1,5	1,62	1,80	1,98	2,10
Масса подаваемого материала	X_3	m , 1×10^{-3} кг	8	48,0	53,46	61,50	69,54	75,0

Значение массы подаваемого материала, соответствующее центру плана (табл. 1), назначалось согласно рекомендациям к высоте слоя подаваемых частиц, не превышающей четырехкратного размера ширины отверстия сита [2, 4]. Перед началом процесса грохочения материал ровным слоем распределялся на четверти просеивающей поверхности сита в его загрузочной ча-

сти. Гранулометрический состав назначался соответствующим протоколу испытаний №134 щебеночно-песчаной смеси (фракции 0-5) компании ООО «ДСПК ДОРОЖНИК» от 27.11.2018 г [19]. Место отбора пробы: ООО ТД «ГТК». Карьер-изготовитель: Бускусанское месторождение. Гранулометрический состав подаваемого на сита частиц материала приведен в табл. 2.

Таблица 2

Гранулометрический состав частиц материала

Диаметр частиц, мм	5	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,25	1	0,63
Содержание частиц, %	27,39	25,93	1,19	1,14	1,11	1,07	1,03	1,00	0,96	0,93	0,90	0,87	0,84	0,81	0,78	7,15	26,9

В зависимости от массы m подаваемого в соответствии с данными табл. 1 материала, количество входящих в него частиц изменялось в пределах 40744 – 83862 штук. Количество частиц и их массы в выделенных местах цифровых моделей грохота определялись с использованием возможностей используемой программной среды.

Основная часть. В результатах обработки экспериментальных данных, полученных в программной среде Altair EDEM при проведении виртуальных экспериментов на ПЭВМ по плану ЦКРП-2³, разработано уравнение регрессии, адекватно описывающие эффективность грохочения в зависимости от факторов.

Кодированная форма уравнения, после определения значимости коэффициентов, имеет вид:

$$E = 88,870 - 18,185 \cdot X_1 + 0,834 \cdot X_2 + 0,711 \cdot X_1 \cdot X_3 - 9,539 X_1^2 - 1,314 X_2^2 - 1,593 X_3^2. \quad (2)$$

Натуральная форма уравнения:

$$E = -173,291 + 34,014 \cdot a + 150,633 \cdot l + 0,074 \cdot a \cdot m + 2,762 \cdot m - 6,736 \cdot a^2 - 40,555 \cdot l^2 - 0,025 \cdot m^2. \quad (3)$$

В программной среде *Mapple* проведено исследование уравнения (3), получены графические

зависимости, которые характеризуют изменение функции (рис. 2).

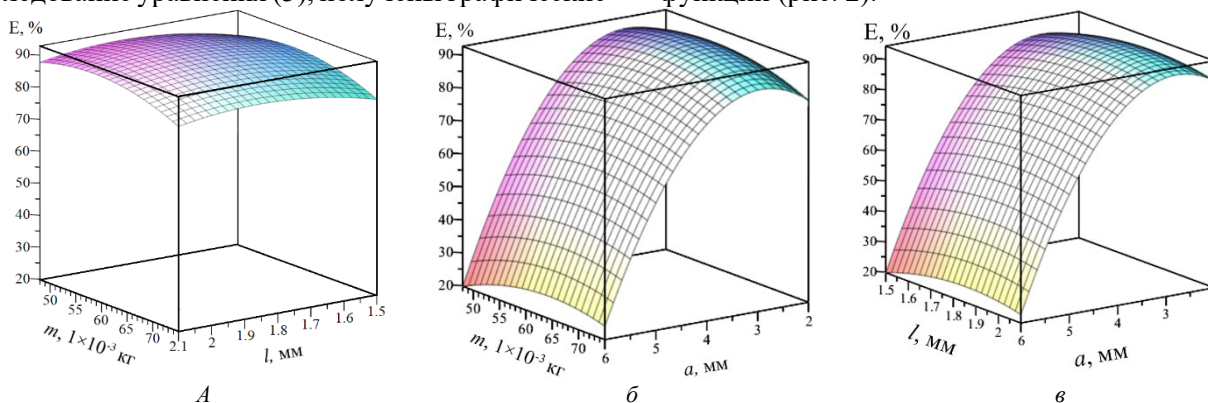


Рис. 2. Графические зависимости эффективности грохочения E от амплитуды колебаний a , ширины щели между колосниками первой просеивающей поверхности l , массы подаваемого материала m :
 $a - a = 2$ мм; $b - l = 1,5$ мм; $v - m = 48 \cdot 10^{-3}$ кг

В заданной области функция является непрерывной. Установлены экстремумы функции. Минимальное значение $E_{\min} = 19,7$ % функция принимает при $a = 6$ мм, $l = 1,5$ мм, $m = 48 \cdot 10^{-3}$ кг. Максимальное значение $E_{\max} = 97,7$ % - при $a = 2,85$ мм, $l = 1,85$ мм, $m = 59,7 \cdot 10^{-3}$ кг. Разница между $E_{\max}$ и $E_{\min}$ составляет 77,9 %.

Варьирование значениями амплитуды колебаний сита a в исследуемом диапазоне приводит к выраженному нелинейному характеру изменения функции. Причем этот фактор оказывает значительно большее влияние, в сравнении с m и l , на значения E . На начальном этапе увеличение зна-

чений a приводит к росту значений E с последующим их уменьшением при увеличении значений рассматриваемого фактора. Так, при $l=1,5$ мм, $m=48 \cdot 10^{-3}$ кг и $a_1=2$ мм, $a_2=3$ мм, $a_3=6$ мм эффективность грохочения соответственно принимает значения $E_{11}=84,9\%$, $E_{12}=88,8\%$ и $E_{13}=19,7\%$. При увеличении l и m до $l=1,8$ мм, $m=61,5 \cdot 10^{-3}$ кг эффективность грохочения соответственно принимает значения $E_{21}=92,4\%$, $E_{22}=97,1\%$ и $E_{23}=31,3\%$. При дальнейшем увеличении l и m до $l=2,1$ мм, $m=75 \cdot 10^{-3}$ кг эффективность грохочения соответственно принимает значения $E_{31}=83,6\%$, $E_{32}=89,6\%$ и $E_{33}=26,5\%$.

Изменение значений l приводит также к нелинейному изменению значений E с расположением максимальных ее величин вблизи центральной области значений этого фактора. На начальном этапе увеличение его значений приводит к росту значений E с последующим их уменьшением при увеличении значений этого фактора. Так, при $a=2$ мм, $m=48 \cdot 10^{-3}$ кг и $l_1=1,5$ мм, $l_2=1,8$ мм, $l_3=2,1$ мм эффективность грохочения соответственно принимает значения $E_{41}=84,9\%$, $E_{42}=89,9\%$ и $E_{43}=87,7\%$. При увеличении a и m до $a=4$ мм, $m=61,5 \cdot 10^{-3}$ кг эффективность грохочения соответственно принимает значения $E_{51}=83,8\%$, $E_{52}=88,8\%$ и $E_{53}=86,6\%$. При увеличении a и m до $a=6$ мм, $m=75 \cdot 10^{-3}$ кг эффективность грохочения соответственно принимает значения $E_{61}=23,80\%$, $E_{62}=28,84\%$ и $E_{63}=26,58\%$.

Изменение значений m приводит также к нелинейному изменению E с расположением максимальных ее значений при величинах m , близких к центру плана (табл. 1). На начальном этапе увеличение значений l приводит к росту значений E с последующим их уменьшением при увеличении значений этого фактора. Так, при $a=2$ мм, $l=1,5$ мм и $m_1=48 \cdot 10^{-3}$ кг, $m_2=61,5 \cdot 10^{-3}$ кг, $m_3=75 \cdot 10^{-3}$ кг, эффективность грохочения соответственно принимает значения $E_{71}=84,7\%$, $E_{72}=87,4\%$ и $E_{73}=80,8\%$. При $a=4$ мм, $l=1,8$ мм и указанных значениях m_1, m_2, m_3 функция принимает значения $E_{81}=84,3\%$, $E_{82}=88,8\%$ и $E_{83}=84,3\%$, соответственно. При $a=6$ мм, $l=2,1$ мм и указанных значениях m_1, m_2, m_3 функция принимает значения $E_{91}=22,5\%$, $E_{92}=29,1\%$ и $E_{93}=26,5\%$, соответственно.

К рациональным областям значений можно отнести: для относительной амплитуды колебаний сита - $a=2 \dots 3$ мм; для ширины щели первой просеивающей поверхности - $l=1,8 \dots 1,9$ мм; для массы подаваемого материала: $m=(55 \dots 65) \cdot 10^{-3}$ кг.

На иллюстрациях рис. 3 приведены продольные разрезы моделей корпусов грохота с составной конструкцией шпальтового сита и конструкцией его прототипа через $t=0,2$ с после начала процесса классификации. В этом эксперименте рассматриваемые факторы обеспечивали максимальное значение $E_{\max}=97,7\%$ и имели значения: $a=2,85$ мм, $l=1,85$ мм, $m=59,7 \cdot 10^{-3}$ кг. Масса частиц нижнего класса в исходном материале составляла $m_0=21,31 \cdot 10^{-3}$ кг, а их количество - $n_0=56027$ шт. В табл. 3 и табл. 4 приведены значения характеризующих процессы грохочения параметров.

Из данных табл. 3 следует, что на начальном этапе, на промежутке с $t_0=0$ до $t_2=0,4$ с, процесс классификации составной конструкцией сита осуществляется менее эффективно, что подтверждается значениями $E_{12}=52,67\%$ и соответствующей конструкции сита прототипа $E_{22}=56,70\%$ (вторая цифра индекса параметра соответствует порядковому номеру эксперимента в табл. 3 и табл. 4). Причина заключается в двухэтапном процессе классификации на составной конструкции сита - сначала его первой просеивающей поверхностью, а затем, с некоторым запаздыванием, второй просеивающей поверхностью. При дальнейшем продолжении процесса классификации описанные ранее преимущественные особенности этого сита обеспечивают повышение эффективности этого процесса начиная с $t_3=0,8$ с ($E_{13}=90,94\%$, $E_{23}=81,69\%$). Процессы классификации на моделях корпусов с составной конструкцией сита и его прототипом завершаются с характеризующими их значениями $E_{18}=97,70\%$ и $E_{27}=89,99\%$, соответственно. Таким образом, разница в 7,7 % между этими значениями характеризует разработанную составную конструкцию шпальтового сита как более эффективную, обеспечивающую повышение качества процесса классификации материала.

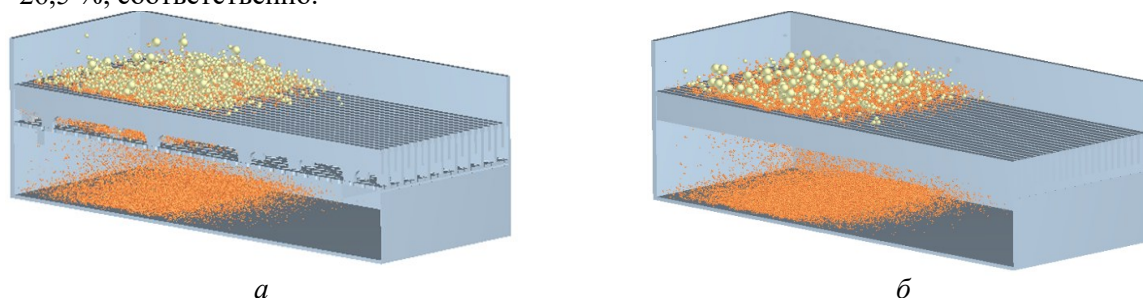


Рис. 3. Продольные разрезы моделей корпусов грохота через $t=0,2$ с после начала процесса классификации: а - с составной конструкцией шпальтового сита, б - с конструкцией сита прототипа

Таблица 3

Цифровая модель с составной конструкцией сита

N п/п	Время про- цесса, t , с	Масса прошедших через вторую просеивающую по- верхность частиц, $m_1, 1 \times 10^{-3}$ кг	Эффективность процесса классификации, E_1 , %	Разница эффективности процесса классификации с ее предыдущим значением, Δ_1 , %
1	0,2	4,01	18,84	18,84
2	0,4	11,22	52,67	33,83
3	0,8	19,38	90,94	38,26
4	1	19,97	93,70	2,76
5	1,6	20,47	96,05	2,35
6	2	20,58	96,59	0,54
7	3	20,81	97,65	1,05
8	3,9	20,82	97,70	0,05
9	4	20,82	97,70	0

Анализируя изменение разницы предыдущих и последующих значений эффективности процесса классификации Δ_1 и Δ_2 необходимо отметить их значительное увеличение на начальных этапах. При $t_{11}=0,2$, $t_{12}=0,4$ с для составной конструкции сита увеличение этого параметра осуществляется соответственно до $\Delta_{11}=18,84$ % и $\Delta_{12}=33,83$ %, для конструкции его прототипа – до $\Delta_{21}=20,90$ % и $\Delta_{22}=35,80$ %. Затем, при $t_3=0,8$ с, происходит его незначительное увеличение для составной кон-

струкции сита ($\Delta_{13}=38,26$ %) и достаточно значительное уменьшение для конструкции сита прототипа ($\Delta_{23}=24,98$ %). Продолжение моделирования процессов приводит к существенным уменьшениям рассматриваемого параметра (до нескольких единиц) для обеих моделей корпусов грохота. Эта тенденция продолжается до завершения процессов моделирования, которые заканчиваются для моделей грохота: с составной конструкцией сита - при $t_{18}=3,9$ с; с конструкцией сита прототипа - при $t_{27}=3$ с.

Таблица 4

Цифровая модель с конструкцией сита прототипа

N п/п	Время про- цесса, t , с	Масса прошедших через просеивающую по- верхность частиц, $m_2, 1 \times 10^{-3}$ кг	Эффективность процесса классификации, E_2 , %	Разница эффективности процесса классификации с ее предыдущим значением, Δ_2 , %
1	0,2	4,45	20,90	20,90
2	0,4	12,08	56,70	35,80
3	0,8	17,41	81,69	24,98
4	1	17,61	82,62	0,93
5	1,6	18,52	86,93	4,31
6	2	18,91	88,76	1,83
7	3	19,17	89,99	1,23
8	3,9	19,17	89,99	0
9	4	19,17	89,99	0

Завершение процесса грохочения материала массой $m=59,7 \cdot 10^{-3}$ кг на цифровой модели грохота с составной конструкцией шпальтового сита за $t_{27}=3$ с характеризует ее производительность $Q_{27}=71$ кг/ч.

Полученные с использованием программного продукта Altair EDEM результаты позволяют сделать вывод о повышении на цифровой модели с составной конструкцией шпальтового сита, в сравнении с цифровой моделью конструкции прототипа, эффективности процесса сухого грохочения. Это является основанием целесообразности разработки математического описания процесса сухого грохочения на составной конструкции шпальтового сита, подтверждения его адекватности на физической модели грохота, установления

рациональных значений конструктивно-технологических параметров и сравнения полученного значения эффективности процесса грохочения с аналогичным показателем для конструкции прототипа. Завершающим этапом проводимых мероприятий будет являться разработка методики расчета конструктивно-технологических параметров грохота с составной конструкцией шпальтового сита для использования в промышленных условиях.

Выводы.

1. Рассмотрены основные направления совершенствования вибрационных грохотов. Показаны преимущества шпальтовых сит различных конструкций и их недостатки, свидетельствующие

щие о необходимости поиска решений, обеспечивающих повышение качества производимого на них продукта грохочения.

2. Приведено описание разработанной составной конструкции шпальтового сита и обусловленных его конструктивным исполнением преимущественных особенностей реализуемого двухстадийного процесса разделения частиц материала по размерам.

3. В программном продукте Altair EDEM проведено, на моделях составной конструкции шпальтового сита и его прототипа, имитационное моделирование процессов грохочения. Для составной конструкции шпальтового сита получена регрессионная зависимость эффективности E процесса грохочения от амплитуды колебаний сита, ширины щели первой просеивающей поверхности и массы подаваемого материала, выполнено ее исследование. Установлено влияние рассматриваемых факторов на значения E , определены их рациональные значения.

4. Сопоставление значений эффективности E процесса грохочения, полученных на моделях прототипа и составной конструкции шпальтового сита, показало соответствующее увеличение этого показателя с 89,99 % до 97,70 %. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности разработки математического описания процесса сухого грохочения на составной конструкции шпальтового сита, подтверждения его адекватности на физической модели грохота, установления рациональных значений конструктивно-технологических параметров и сравнения полученного значения эффективности процесса грохочения с аналогичным показателем для конструкции прототипа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасимов М.Д. Теоретические и технические основы совершенствования вибрационных грохотов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. 126 с.

2. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов: Конструкции, материалы, опыт применения: монография. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. 252 с.

3. Надутый В.П., Лапшин Е.С. Влияние забивания отверстий просеивающей поверхности на кинетику вибрационного грохочения // Вібрації в техніці та технологіях. 2009. №4(56). С. 107–110.

4. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.

5. Пелевин А.Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 1. С. 119–129.

6. Огурцов В.А., Алешина А.П., Огурцов А.В., Брик Е.Р. Кинетика фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов с применением ситовых тканых полотен // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. № 1. С. 201–204.

7. Пат. 225593, Российская Федерация, МПК В07В 1/40, В07В 1/46. Вибрационный грохот / С. И. Ханин, М. А. Малахов, О. С. Мордовская; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова». №2024105121, заявл. 28.02.2024; опублик. 25.04.2024, бюл. №12. 12 с.

8. Огурцов В. А., Алешина А. П., Федосов С. В., Мизонов В. Е. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе цепей Маркова // Строительные материалы. 2008. №5. С. 33–35.

9. Юдин А.В. Моделирование вероятности процесса извлечения фракций на колосниковой просеивающей поверхности с открытой щелью // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 2. С. 91–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-91-96.

10. Ханин С.И., Зыбин Р.В., Мордовская О.С. Повышение эффективности процесса классификации материала в классифицирующей перегородке шаровой мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 9. С. 97–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-97-107.

11. Bembenek M., Buczak M., Baiul K. Modeling of the Fine-Grained Materials Briquetting Process in a Roller Press with the Discrete Element Method // Materials. 2022. Vol. 15(14). 4901. DOI: 10.3390/ma15144901

12. Hou Sh., Wang Sh., Ji Zh., Zhu X. Design and Test of the Clearing and Covering of a Minimum-Tillage Planter for Corn Stubble // Agriculture. 2022. Vol. 12(8). 1209. DOI: 10.3390/agriculture12081209.

13. Geng Yu., Wang X., Zhong X. Design and Optimization of a Soil-Covering Device for a Corn No-Till Planter // Agriculture. 2022. Vol. 12, No. 8. – 1218. DOI 10.3390/agriculture12081218.

14. Maximenko A.L., Hetman O. I., Shtern M.B., Olevsky E.A. Modeling the Gas Permeability of the Powder Bed in a Rotary Furnace // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2023. Vol. 62(7-8). Pp. 383–389. DOI 10.1007/s11106-024-00401-z.

15. Li G., Ma Ju., Tian X. Discrete Meta-Simulation of Silage Based on RSM and GA-BP-GA Optimization Parameter Calibration // Processes. 2023. Vol. 11(9). 2784. DOI 10.3390/pr11092784.

16. Amadi A.H., Mohyaldinn M., Abduljabbar A. Analysis of NiTi Sand Screens Using Altair Discrete Element Method // Materials. 2024. Vol. 17(2). 281. DOI 10.3390/ma17020281.

17. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Л., «Химия», 1975. 48 с.

18. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О. С. Богданова, В. А. Олевского, 2-е изд., перераб. и доп., М.: Недра, 1982. 365 с.

19. Akwatoria. [Электронный ресурс]. URL: <https://akwatoria.ru/protokol/sheben/>. (Дата обращения: 18.04.2024)

Информация об авторах

Ханин Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: dh@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Малахов Михаил Алексеевич, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: exe912@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мордовская Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: unique.ox@gmail.com. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, зав. кафедрой механического оборудования. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 18.02.2024 г.

© Ханин С.И., Малахов М.А., Мордовская О.С., Анциферов С.И., 2024

^{1,*}*Khanin S. I.*, ¹*Malakhov M. A.*, ²*Mordovskaya O. S.*, ¹*Antsiferov S. I.*

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

²*Belgorod State National Research University.*

**E-mail: dh@intbel.ru*

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE SCREENING PROCESS ON A VIBRATING SCREEN WITH A COMPOSITE CONSTRUCTION OF A TRELLIS SIEVE

Abstract. Screens based on the principle of the vibrating effect of the sifting surface on the processed material provide the required separation efficiency and high productivity, which makes them indispensable in various industries, including mining, building materials and many others. The main directions of improvement of vibrating screens are considered. The advantages of trellis sieves of various designs and their disadvantages are shown, indicating the need to find solutions to improve the quality of the screening product produced on them. The description of the developed composite structure of the trellis sieve and the predominant features of the implemented two-stage process of separation of material particles by size due to its design are given. The expediency of conducting experimental studies aimed at investigating the screening process of dry bulk materials in a vibrating screen with a trellis screen of the developed design, which allows effectively separating "obstructing" particles, is substantiated. In the Altair EDEM software product, simulation modeling of the screening process using the method of mathematical planning of the experiment was carried out on models of the composite structure of a trellis sieve and its prototype. For the composite structure of a trellis sieve, a regression dependence of the efficiency of the screening process on the amplitude of the sieve vibrations, the width of the slots of the first screening surface and the mass of the supplied material was obtained, and its study was performed. The influence of the considered factors on the values of the function is established, their rational values are determined. A comparison of the screening efficiency indicators of the developed design of a trellis sieve with its prototype is carried out.

Keywords: vibrating screen, screening efficiency, "obstructing" grains, trellis screen, simulation modeling

REFERENCES

1. Gerasimov M.D. Theoretical and technical foundations for improving vibration screens [Teoreticheskie i tekhnicheskie osnovy sovershenstvovaniya vibratsionny'x groxotov]. Belgorod: Publishing House BSTU named after V. G. Shukhov, 2015. 126 p. (rus)
2. Weisberg L.A., Kartavy A.N., Korovnikov A.N. Sieving surfaces of screens: Structures, materials, application experience [Proseivayushhie poverxnosti groxotov: Konstrukcii, materialy, opyt primeneniya]. St. Petersburg: Publishing House VSEGEI, 2005. 252 p. (rus)
3. Inflated V.P., Lapshin E.S. The effect of clogging the holes of the sieving surface on the kinetics of vibration screening [Vliyanie zabivaniya otverstij proseivayushhej poverxnosti na kinetiku vibratsionnogo groxocheniya]. Vibratsii in technici and tehnologii. Kyiv. No. 4(56), 2009. Pp. 107–110. (rus)
4. Weisberg L.A. Design and calculation of vibration screens [Proektirovanie i raschet vibratsionny'x groxotov]. M.: Nedra, 1986. 144 p. (rus)
5. Pelevin A.E. Probability of particles passing through a sieve and the process of segregation on a vibration screen [Veroyatnost' proxozhdeniya chasticz cherez sito i process segregacii na vibratsionnom groxote]. News of universities. Mining Journal. 2011. No. 1. Pp. 119–129. (rus)
6. Ogurtsov V.A., Aleshina A.P., Ogurtsov A.V., Brik E.R. Kinetics of fractionation of fine loose materials using sieve woven fabrics [Kinetika frakcionirovaniya melkodispersny'x sy'puchix materialov s primeneniem sitovy'x tkany'x poloten]. Izv. universities. Textile industry technology. 2016. No. 1. Pp. 201–204. (rus)
7. Khanin S.I., Malakhov M.A., Mordovskaya O.S. Vibration rumble. Patent RF, no. 225593, 2024.
8. Ogurtsov V.A., Aleshina A.P., Fedosov S.V., Mizonov V.E. Modeling of vibration roasting kinetics based on Markov chains [Modelirovanie kinetiki vibrogroxoche-niya na osnove cepej Markova]. Building materials. 2008. No. 5. Pp. 33–35. (rus)
9. Yudin A.V. Modeling the probability of the process of extraction of fractions on a grate screening surface with an open gap [Modelirovanie veroyatnosti processa izvlecheniya frakcij na kolosnikovoj proseivayushhej poverxnosti s otkry'toj shhel'yu]. News of universities. Mining Journal. 2018. No. 2. Pp. 91–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-91–96. (rus)
10. Khanin S.I., Zybin R.V., Mordovskaya O.S. Improving the efficiency of the material classification process in the classifying partition of a ball mill [Povy'shenie e'ffektivnosti processa klassifikacii materiala v klassificiruyushhej peregorodke sharovoj mel'nicy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 9. Pp. 97–107. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-9-97-107. (rus)
11. Bembenek M., Buczak M., Baiul K. Modeling of the Fine-Grained Materials Briquetting Process in a Roller Press with the Discrete Element Method. Materials. 2022. Vol. 15(14). 4901. DOI: 10.3390/ma15144901
12. Hou Sh., Wang Sh., Ji Zh., Zhu X. Design and Test of the Clearing and Covering of a Minimum-Tillage Planter for Corn Stubble. Agriculture. 2022. Vol. 12(8). 1209. DOI: 10.3390/agriculture12081209.
13. Geng Yu., Wang X., Zhong X. Design and Optimization of a Soil-Covering Device for a Corn No-Till Planter. Agriculture. 2022. Vol. 12, No. 8. – 1218. DOI 10.3390/agriculture12081218.
14. Maximenko A.L., Hetman O. I., Shtern M.B., Olevsky E.A. Modeling the Gas Permeability of the Powder Bed in a Rotary Furnace. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2023. Vol. 62(7-8). Pp. 383–389. DOI 10.1007/s11106-024-00401-z.
15. Li G., Ma Ju., Tian X. Discrete Meta-Simulation of Silage Based on RSM and GA-BP-GA Optimization Parameter Calibration. Processes. 2023. Vol. 11(9). 2784. DOI 10.3390/pr11092784.
16. Amadi A.H., Mohyaldinn M., Abduljabbar A. Analysis of NiTi Sand Screens Using Altair Discrete Element Method. Materials. 2024. Vol. 17(2). 281. DOI 10.3390/ma17020281.
17. Sautin S.N. Planning an experiment in chemistry and chemical technology [Planirovanie e'ksperimenta v ximii i ximicheskoy tehnologii]. L., "Chemistry", 1975. 48 p. (rus)
18. Ore beneficiation handbook. Preparatory processes [Spravochnik po obogashheniyu rud. Podgotovitel'ny'e processy']. Ed. O.S. Bogdanov, V.A. Olevsky, 2nd ed., Revised. and add., M.: Nedra, 1982. 365 p. (rus)
19. Akwatoria. URL: <https://akwatoria.ru/protokol/sheben/>. (Accessed: 18.04.2024)

Information about the author

Khanin, Sergey I. DSc, Professor of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: dh@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Malakhov, Mikhail A. Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: exe912@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Mordovskaya, Olga S. PhD, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies. E-mail: unique.ox@gmail.com. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, st. Victory, 85.

Antsiferov, Sergey I. PhD, Head of the Department of Mechanical equipment. E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V. G. Shu-hov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, d. 46.

Received 18.02.2024

Для цитирования:

Ханин С.И., Малахов М.А., Мордовская О.С., Анциферов С.И. Исследование эффективности процесса грохочения на вибрационном грохоте с составной конструкцией шпальтового сита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №9. С. 131–140. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-2140

For citation:

Khanin S.I., Malakhov M.A., Mordovskaya O.S., Antsiferov S.I. Investigation of the effectiveness of the screening process on a vibrating screen with a composite construction of a trellis sieve. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 131–140. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-131-140