

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

4

2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Г. ШУХОВА

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

№ 4, 2025 год

**SCIENTIFIC AND THEORETICAL JOURNAL
BULLETIN
of BSTU named after V.G. Shukhov
Vol. 4. 2025**

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. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	10.04.2025
Выход в свет	18.04.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,62. Уч.-изд. л. 17,87. Тираж 35 экз. Заказ № 45

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2025

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
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	10.04.2025

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).

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).

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

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

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

Леонович Сергей Николаевич, иностранный член 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).

Тиратурия 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).

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

Матюшин Е.В., Соловьев В.Г.

ВЛИЯНИЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ СТАЛЬНОЙ
ВОЛНОВОЙ ФИБРЫ С СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫМ БЕТОНОМ 8

Абайдуллина Т.Н., Строкова В. В., Тимоховец В.Д., Рафеев Е.С.

АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ КОЛЕИ В АСФАЛЬТОБЕТОНАХ
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ 27

Фролова М.А., Лесовик В.С., Дроздук Т.А.

ВЛИЯНИЕ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ АКТИВНОСТЬ ПЛАСТИФИКАТОРА
МИНЕРАЛЬНОЙ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ САПОНИТСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ 35

Тимофеев П.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЕБЕТОННЫХ УЗЛОВ, НА ОСНОВЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАРУБЕЖНЫХ УЧЕНЫХ 42

Клековкин Е.А.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ В СРЕДЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ 56

Ли Яньбо

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ
ДОМОВ ПРЕСТАРЕЛЫХ 69

Тонких В.Д., Перов Ф.В.

ПЛАНИРОВОЧНАЯ СТРУКТУРА КОВОРКИНГ-ЦЕНТРОВ 84

Перькова М.В., Ладик Е.И., Грачева А.А., Дребезгова М.Ю.

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНОГО ФАСАДА НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ УСТЬЯ РЕКИ
ВОЛХОВ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ 96

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Дудина Е.И., Сыса О.К., Дороганов В.А., Локтионова Е.В.

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МАСС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКОЙ
ПЛИТКИ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ОБЛИЦОВКИ СТЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛИНЫ
ЧИБИСОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ 112

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Баранов Д.С., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., Дуганов В.Я., Латышев С.С.

ПРОБЛЕМА ПРОИЗВОДСТВА КРУТОИЗОГНУТЫХ ОТВОДОВ
ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ 121

Чуев К.В., Дуюн Т.А., Дуганов В.Я., Дегтярь А.Н., Кравченко В.М.

ИМИТАЦИОННОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВОГО КОЛЬЦА 133

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Matiushin E.V., Soloviev V.G.

INFLUENCE OF AGGREGATE ON THE BOND STRENGTH OF CORRUGATED
STEEL FIBER WITH ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE

8

Abaidullina T.N., Strokova V.V., Timokhovets V.D., Rafeikova E.S.

INTENSITY ANALYSIS OF RUTTING IN VARIOUS TYPES OF ASPHALT CONCRETE

27

Timofeev P.S.

INVESTIGATION OF THE CAPABILITIES OF NUMERICAL MODELING FOR
THE DESIGN OF STEEL-CONCRETE CONNECTIONS BASED ON EXPERIMENTAL
STUDIES OF FOREIGN RESEARCHERS

35

Frolova M.A., Lesovik V.S., Drozdyuk T.A.

INFLUENCE OF MINERAL FINE SAPONITE-CONTAINING ADDITIVE ON SURFACE
ACTIVITY OF PLASTICIZER

42

Klekovkin E.A.

ALGORITHMIC DESIGN OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF INDUSTRIAL
BUILDINGS USING VISUAL PROGRAMMING

56

Li Yanbo

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL AND SPATIAL
SOLUTIONS OF NURSING HOMES

69

Tonkikh V.D., Perov F.V.

PLANNING STRUCTURE OF COWORKING CENTERS

84

Perkova M.V., Ladik E.I., Gracheva A.A., Drebezgova M.Yu.

FORMATION OF THE WATER FACADE OF SETTLEMENTS MOUTH
OF THE VOLKHOV RIVER IN THE LENINGRAD REGION

96

CHEMICAL TECHNOLOGY

Dudina K.I., Sysa O.K., Doroganov V.A., Loktionova E.V.

DEVELOPMENT OF MASS COMPOSITIONS FOR THE PRODUCTION
OF CERAMIC TILES FOR INTERIOR CLADDING OF WALLS USING CLAY FROM
THE CHIBISOVSKOE DEPOSIT

112

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Baranov D.S., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N., Duganov V.Ya., Latyshev S.S.

THE PROBLEM OF PRODUCING SHARPLY BENT ELBOWS
FROM HEAT-RESISTANT STEELS

121

Chuev K.V., Duyn T.A., Duganov V.Y., Degtyar A. N., Kravchenko V.M.

SIMULATION-BASED DYNAMIC MODELING OF THE BEAD WIRE EXTRACTION
PROCESS

133

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-8-26

*Матюшин Е.В., Соловьев В.Г.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: matyushinev@mgsu.ru

ВЛИЯНИЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ВОЛНОВОЙ ФИБРЫ С СВЕРХВЫСОКОПРОЧНЫМ БЕТОНОМ

Аннотация. В статье рассмотрено влияние объемного содержания и размера частиц заполнителя на прочность сцепления стальной волновой фибры с сверхвысокопрочным бетоном различного состава. Исследование проводилось путем выдергивания единичного волокна из бетонов с прочностью при сжатии в диапазоне 56–175 МПа, объемной концентрацией заполнителя от 0 до 0,4 м³/м³ и максимальным размером частиц 0,4–0,8 мм.

Установлено, что прочность сцепления волновой фибры зависит от параметра $S_{\text{общ}}$, отражающего общую площадь поверхности заполнителя в составе, при расчете которого используется как объемная концентрация, так и размер частиц заполнителя. Прочность сцепления может быть увеличена до 42% при изменении параметра $S_{\text{общ}}$ с 0 до $12,4 \cdot 10^3$ м². Вклад заполнителя в прочность сцепления наблюдается только при условии отсутствия разрушения цементного камня под отгибами волокна. Было показано аналитически, что цементный камень с прочностью при сжатии более 143–148 МПа способен выдержать передаваемое на него усилие при выдергивании фибры без разрушения. Если прочность цементного камня ниже указанного значения, вклад заполнителя в прочность сцепления либо минимален, либо полностью отсутствует.

Были получены эмпирические уравнения для прогнозирования прочности сцепления волновой фибры с учетом различных рецептурных параметров бетонной матрицы, включающих активность цемента, водоцементное соотношение, содержание микрокремнезема, объемную концентрацию и размер частиц заполнителя. Средняя и максимальная относительная погрешность между расчетными и экспериментальными значениями составила 4,5 и 11,1 %, соответственно.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный бетон, стальная фибра, волновая фибра, прочность сцепления, размер частиц заполнителя, объем заполнителя.

Введение. Сверхвысокопрочный бетон (СВБ) представляет собой относительно новый конструкционный материал, который в последние годы активно применяется при строительстве мостов [1, 2], устройстве упоров для пост-напрягаемой арматуры [3], устройстве дорожных покрытий [4], заделке стыков между железобетонными элементами [5, 6], а также для ремонта поврежденных конструкций [7]. Основным преимуществом СВБ является низкая пористость и, как следствие, низкая водо- и газопроницаемость, что обеспечивает высокую прочность и долговечность даже при эксплуатации в агрессивной среде. Особые свойства СВБ достигаются путем тщательной оптимизации плотности упаковки частиц, использования активных минеральных добавок и снижения водоцементного соотношения менее 0,25. Во избежание хрупкого разрушения и повышения прочности на растяжение СВБ армируется стальной фиброй различного профиля и геометрических размеров, в результате чего получают сверхвысокопрочный фибробетон (СВФБ), который характеризуется прочностью при сжатии в диапазоне 150–240 МПа [3, 8].

Одним из ключевых свойств СВФБ является прочность при осевом растяжении. За счет оптимизации свойств бетонной матрицы, контактной зоны и фибрового армирования является возможным получение композитов с прочностью при осевом растяжении до 15–20 МПа [8, 9]. При объемном содержании стальной фибры более 1–1,5 % СВФБ приобретает свойство деформационного упрочнения в процессе осевого растяжения, которое характеризуется увеличением воспринимаемого материалом напряжения после образования первой трещины в бетонной матрице [10]. Деформационное упрочнение сопровождается образованием множества равномерно распределенных трещин с шириной раскрытия порядка 15–20 мкм [11], что обеспечивает высокую предельную относительную деформацию до начала разрушения материала, которое знаменуется выдергиванием фибры из бетона. К основным преимуществам деформационно-упрочняющихся фибробетонов относится высокая энергия разрушения, что особенно актуально для конструкций, возводимых в сейсмически активных регионах или для конструкций, подвергаемых

ударному воздействию. Фибробетон является деформационно-упрочняющимся, если выполняется следующее условие [12]:

$$\sigma_{pc} > \sigma_{cc} \quad (1)$$

где σ_{pc} – напряжение, которое воспринимает группа фибр, пересекающих трещину, МПа;

σ_{cc} – напряжение, при котором образуется первая трещина в бетонной матрице, МПа.

Величина σ_{cc} определяется в основном прочностью бетонной матрицы, в то время как σ_{pc} зависит от структуры фибрового армирования и определяется по формуле [9]:

$$\sigma_{pc} = \lambda \cdot V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \cdot \tau_f, [\text{МПа}] \quad (2)$$

где λ – безразмерный коэффициент, учитывающий ориентацию фибры, среднюю длину заделки и взаимное влияние волокон друг на друга;

V_f – объемная доля фибры;

l_f, d_f – длина и диаметр фибры, мм;

τ_f – прочность сцепления фибры с бетоном, МПа.

Каждая из входящих в уравнение 2 переменная приводит к пропорциональному увеличению значения σ_{pc} , однако при проектировании составов фибробетонов имеется ряд ограничений, связанных с лимитированием объемной концентрации V_f и соотношения l_f/d_f фибры с точки зрения обеспечения требуемой удобоукладываемости фибробетонной смеси [9] и ее стоимости. Наиболее оптимальным путем повышения значения σ_{pc} является целенаправленное регулирование прочности сцепления фибры с бетоном. На сегодняшний день известны различные способы повышения прочности сцепления: 1) уменьшение пористости цементного камня за счет снижения водоцементного соотношения [13, 14] и использования минеральных добавок, таких как микрокремнезем [15], расширяющей добавки [16], наноразмерных частиц карбоната кальция [17], диоксида кремния [13, 18], диоксида титана [19]; 2) использование деформированных типов волокон [20]; 3) химическая [21] и механическая [22] обработка поверхности фибры. Из различных исследований также известно, что, помимо вышеуказанных факторов, заполнитель также оказывает влияние на прочность сцепления фибры. В работе [23] увеличение соотношения песка к цементу (П/Ц) с 0 до 1,38 привело к увеличению прочности сцепления прямой фибры с СВБ на 62 %, а уменьшение среднего размера частиц с 0,42 до 0,11 мм – на 52 %. Уменьшение максимального размера частиц с 2,36 до 1,18 мм привело к увеличению прочности сцепления прямой и анкерной фибры на 18 и 5 %, соответственно [24]. В работе [25] увеличение П/Ц с 0 до 1,37 привело к увеличению прочности сцепления

прямой фибры на 38 %. Подобная тенденция наблюдается и в высокопрочных бетонах для волокон с деформированным профилем [26], и в растворах средней прочности для прямой фибры [27].

Из проведенного литературного обзора очевидно, что на прочность сцепления фибры влияют два параметра: размер частиц и содержание заполнителя в составе бетона. Для одновременного учета этих двух показателей предложен новый рецептурный параметр, $S_{\text{общ}}$, который представляет собой общую площадь поверхности частиц заполнителя в составе бетонной матрицы и рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n V_{3,i} \cdot \rho_{3,i} \cdot S_{3,i}, [\text{м}^2] \quad (3)$$

где $V_{3,i}$ – объемное содержание i -ой фракции заполнителя, м^3 ;

$\rho_{3,i}$ – истинная плотность i -ой фракции заполнителя, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$S_{3,i}$ – удельная поверхность i -ой фракции заполнителя, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Удельная поверхность i -ой фракции заполнителя определяется по следующему уравнению:

$$S_{3,i} = f \cdot \frac{6000}{\rho_{3,i} \cdot d_{3,i}}, [\text{м}^2/\text{кг}] \quad (4)$$

где f – безразмерный коэффициент, учитывающий форму частиц заполнителя;

$d_{3,i}$ – средний размер частиц i -ой фракции заполнителя, мм.

Коэффициент f определяется как отношение удельной поверхности частиц неправильной формы к удельной поверхности идеально сферических частиц того же диаметра. В предыдущей работе была установлена линейная зависимость между плотностью упаковки монофракционных частиц и коэффициентом f [28]:

$$f = -1,57 \cdot \Phi_{3,i} + 2,13 \quad (5)$$

Целью данной работы было установление влияния вида и объемной концентрации заполнителя на прочность сцепления стальной волновой фибры с сверхвысокопрочным бетоном различного состава и разработка на основе экспериментальных данных модели для прогнозирования прочности сцепления, учитывающей различные рецептурные факторы. Получение подобной модели позволит углубить понимание взаимодействия стальной фибры и сверхвысокопрочной бетонной матрицы, а также проектировать составы сверхвысокопрочных сталефибробетонов с заранее заданным комплексом свойств.

Материалы и методы. Для приготовления бетонных смесей в качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н по ГОСТ

31108 производства ООО «АККЕРМАНН ЦЕМЕНТ», основные свойства которого представлены в таблице 1. В качестве активной минеральной добавки применялся уплотненный микрокремнезем МКУ-85, соответствующий требованиям ГОСТ Р 58894. В качестве инертной минеральной добавки использовалась кварцевая мука с удельной поверхностью 429,6 м²/кг с содержанием кристаллического кварца более 95 %. Для

регулирования удобоукладываемости бетонных смесей использовался суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов MasterGlenium 115 в виде водного раствора. В качестве заполнителя использовался промытый кварцевый песок фракций 0,1–0,4 и 0,4–0,8, основные свойства которого представлены в таблице 2.

Таблица 1

Основные характеристики портландцемента

Свойство	Значение
Удельная поверхность, м ² /кг	353,3
Прочность при изгибе в возрасте 28 суток, МПа	8,04
Прочность при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	56,5
C_3S , %	63,3
C_2S , %	18,0
C_3A , %	5,6
C_4AF , %	9,5

Таблица 2

Основные характеристики заполнителя

Свойство	Значение	
	0,1–0,4	0,4–0,8
Насыпная плотность, кг/м ³	1403	1524
Истинная плотность, кг/м ³	2637	2632
Средний размер частиц, мм	0,25	0,60
Плотность упаковки в насыщенном состоянии	0,532	0,579
Коэффициент формы зерен (по уравнению 5)	1,29	1,22

Была использована стальная латунированная волновая фибра из высокопрочной проволоки с прочностью на растяжение 2700 МПа (ОАО «БМЗ», Беларусь). Внешний вид и геометрические размеры стальной фибры представлены на рисунке 1. Выбор волновой фибры обусловлен тем, что данная форма волокна

является наиболее оптимальной с точки зрения комплекса свойств композита, включающего прочность при сжатии, изгибе, энергии разрушения и седиментационной устойчивости [29].

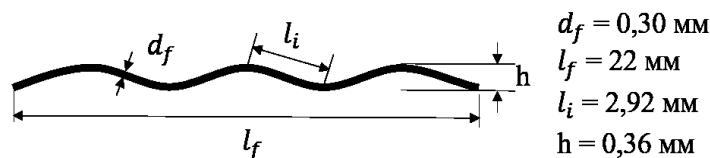


Рис. 1. Геометрические размеры стальной фибры

Для проведения испытаний было использовано 5 составов бетонных матриц с водоцементным соотношением в диапазоне 0,26–0,40 и содержанием микрокремнезема от 0 до 30 % от массы цемента. Обозначение бетонных матриц представлено в виде «М-Х», где Х – порядковый номер состава от 1 до 5. Значение параметра $S_{\text{общ}}$ для каждой матрицы изменялось в пределах 0–12,4·10³ м² с учетом изменения фракционного состава и объемного содержания заполнителя в составе смеси. Для обеспечения значения параметра $S_{\text{общ}}$ 3,5·10³ м² и 7,1·10³ м² использовалась смесь фракций

0,1–0,4 и 0,4–0,8 в соотношении 30:70, для получения значений 6,2·10³ м² и 12,4·10³ использовалась только фракция 0,1–0,4. Содержание суперпластифицирующей добавки составляло 0,5–3,0 % от массы цемента и подбиралось таким образом, чтобы обеспечить диаметр расплыва смеси на конусе Хегерманна в диапазоне 230–270 мм. В таблице 3 представлены составы бетонных матриц в долях от массы цемента (без учета содержания заполнителя), в таблице 4 – перечень испытанных составов с учетом параметра $S_{\text{общ}}$.

Таблица 3

Составы бетонных матриц

Компонент	М-1	М-2	М-3	М-4	М-5
Цемент	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Вода	0,26	0,28	0,32	0,35	0,40
Микрокремнезем	0,30	0,20	0,15	0,10	0,00
Кварцевая мука	0,20	0,20	0,20	0,20	0,00

Таблица 4

Перечень испытанных составов с учетом параметра $S_{\text{общ}}$

Состав	$S_{\text{общ}} \cdot 10^3 \text{ м}^2$				
	0	3,5	6,2	7,1	12,4
М-1	+	–	–	+	+
М-2	+	+	+	+	+
М-3	+	–	–	+	+
М-4	+	+	–	+	+
М-5	+	+	–	+	+
Объем заполнителя, $\text{м}^3/\text{м}^3$	0	0,2	0,4	0,2	0,4
Фракционный состав заполнителя	–	0,1–0,4+0,4–0,8 (30:70)	0,1–0,4+0,4–0,8 (30:70)	0,1–0,4	0,1–0,4

Приготовление бетонных смесей осуществлялось в автоматическом растворосмесителе в следующей последовательности: 1) перемешивание всех сухих компонентов в течение 1 минуты со скоростью 140 об/мин; 2) добавление воды и перемешивание в течение 2 минут со скоростью 140 об/мин; 3) добавление суперпластифицирующей добавки и перемешивание до однородного состояния в течение 1–6 минут со скоростью 280 об/мин. Из свежеприготовленной бетонной смеси изготавливались образцы для определения прочности при сжатии и прочности сцепления фибры с бетоном. Образцы твердели в течение 24 часов в нормальных температурно-влажностных условиях, после чего помещались в камеру тепловлажностной обработки, где хранились в течение последующих 48 часов при температуре $+80^\circ\text{C}$. После тепловлажностной обработки до момента испытания образцы хранились в помещении лаборатории при температуре $+25^\circ\text{C}$ и относительной влажности 30%.

Прочность при сжатии определялась на образцах-кубах размером $40 \times 40 \times 40$ мм. Образцы испытывались на гидравлическом прессе, скорость нагружения составляла 2 МПа/с. Прочность при сжатии отдельного образца определялась по формуле:

$$R = \frac{F}{A}, [\text{МПа}] \quad (6)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;

A – площадь поперечного сечения образца, мм^2 .

Прочность при сжатии состава определялась как среднее арифметическое значение результатов испытаний 6 образцов.

Прочность сцепления фибры с бетоном определялась на половинках образцов-восьмерок, в центр которых было установлено волокно (рисунок 2-в). Глубина заделки фибры в бетон составляла 10 мм. Для фиксации волокна в форме и во избежание его смещения в процессе укладки бетонной смеси использовалась поливинилхлоридная пластина, в центре которой размещалась фибра, скрепленная с пластиной цианакрилатным клеем (рисунок 2-а и 2-б). Испытание проводилось на разрывной машине Instron 3382 (рисунок 2-г). Скорость перемещения траверсы составляла 0,4 мм/мин до значения смещения фибры 2 мм и 3 мм/мин до полного выдергивания фибры из бетона.

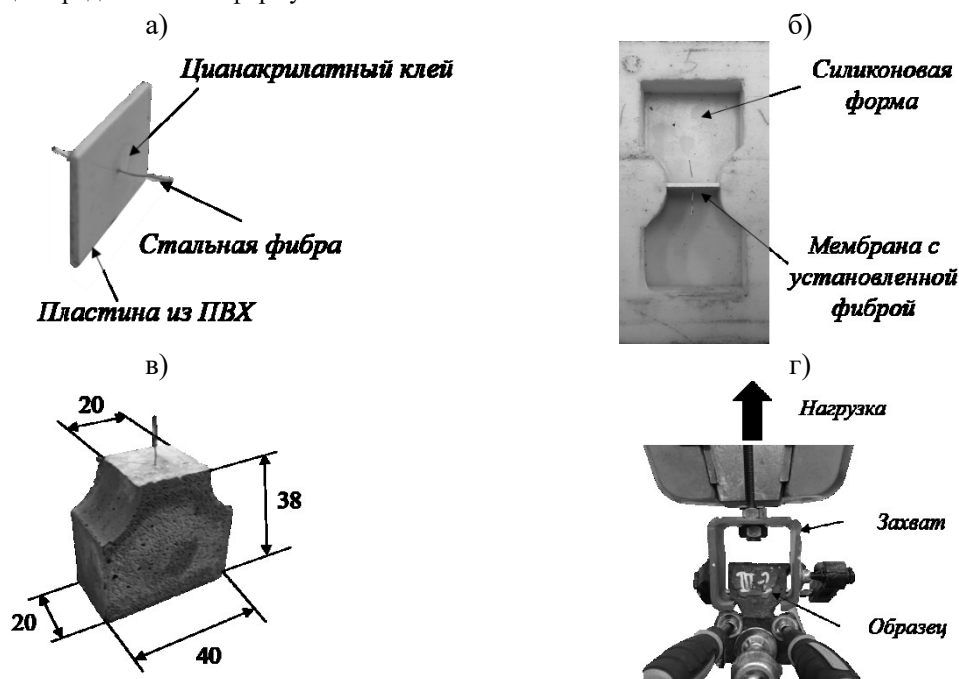


Рис. 2. Определение прочности сцепления фибры с бетоном: а) ПВХ мембрана для крепления фибры; б) силиконовая форма для изготовления образцов; в) геометрические размеры образца; г) процесс испытания образца

В процессе проведения испытания регистрировалась диаграмма «нагрузка-смещение фибры», при помощи которой определялась максимальная нагрузка и рассчитывалась прочность сцепления фибры по формуле:

$$\tau_f = \frac{F_{max}}{\pi \cdot d_f \cdot l_e}, [\text{МПа}] \quad (7)$$

где F_{max} – максимальная нагрузка, полученная в процессе выдергивания, Н;

l_e – длина заделки фибры, мм.

Из каждого состава бетона была изготовлена серия из 6 образцов. Прочность сцепления определялась как среднее арифметическое значение результатов испытаний от 3 до 6 образцов. При обработке результатов не учитывались образцы, в процессе испытания которых произошел разрыв стальной фибры.

Для отдельных образцов была исследована поверхность фибры после ее выдергивания из бетона при помощи растрового электронного микроскопа FEI Quanta 250.

Результаты и обсуждение. На диаграммах рисунка 3 представлены результаты определения прочности сцепления. По представленным данным можно заметить, что прочность сцепления фибры с цементным камнем ($S_{общ} = 0 \cdot 10^3 \text{ м}^2$) уменьшается по мере увеличения водоцементного соотношения и уменьшения количества микрокремнезема в составе. Так, например, прочность сцепления с матрицей М-1 составила 15,1 МПа, а с матрицей М-5 – 5,2 МПа, что на 190 % ниже. Объяснение данному явлению, с одной стороны, заключается в значительной разнице величины В/Ц рассматриваемых составов, которое составляет 0,26 и 0,4. Увеличение В/Ц приводит к увеличению пористости цементного камня [30] и, как следствие, уменьшению эффективной площади контакта с поверхностью сталь-

ной фибры, что приводит к ухудшению сцепления. Аналогичные результаты были получены при выдергивании анкерной фибры из составов с различным В/Ц [14]. С другой стороны, введение в состав бетона микрокремнезема приводит к уплотнению контактной зоны между волокном и окружающей матрицей за счет физического заполнения пустот между более крупными частицами цемента [31], а также протекания пуццолановой реакции между аморфным кремнеземом добавки и гидроксидом кальция, что приводит к образованию гидросиликатов кальция с более развитой удельной поверхностью, что увеличивает число контактов цементного камня с фиброй. Кроме того, введение микрокремнезема в некоторых случаях увеличивает усадку цементного камня, что приводит к увеличению объемного обжатия волокна и увеличению силы трения в контактной зоне [32]. В совокупности это приводит к значительному увеличению прочности сцепления фибры, что также было показано в работе [15].

Для большинства испытанных вариантов бетонных матриц увеличение значения параметра $S_{общ}$ приводит к увеличению прочности сцепления волновой фибры с бетоном, что согласуется с ранее полученными результатам для других типов волокон [23-27]. При изменении параметра $S_{общ}$ с 0 до $12,4 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ прочность сцепления увеличилась на 41,7% для составов с матрицей М-1, на 38,4 % для составов с матрицей М-2, на 14,2 % для составов с матрицей М-3 и на 6 % для составов с матрицей М-4. При испытании составов с матрицей М-5, которые не содержали микрокремнезема и имели наибольшее водоцементное соотношение, все образцы показали примерно одинаковые значения прочности сцепления вне зависимости от значения параметра $S_{общ}$.

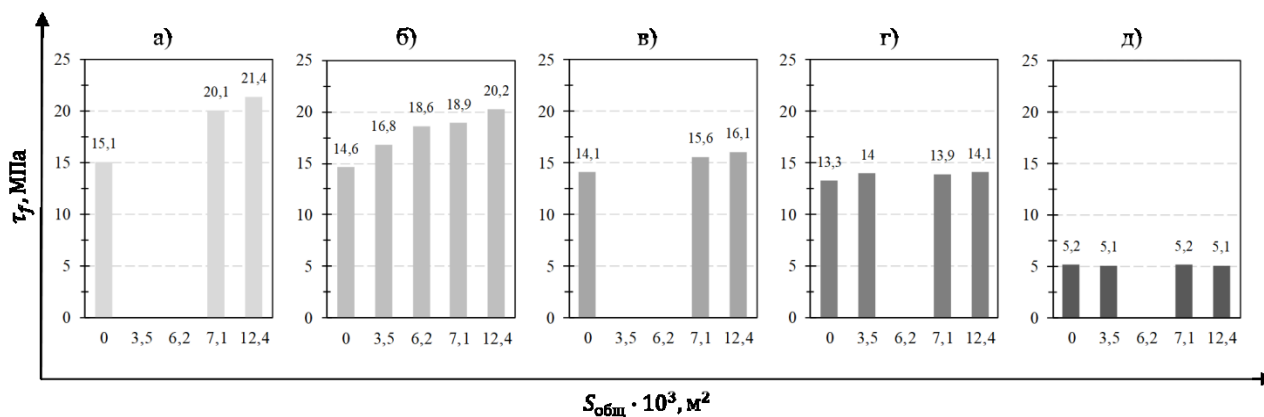


Рис. 3. Зависимость прочности сцепления волновой фибры от параметра $S_{общ}$ для составов с различными матрицами: а) М-1; б) М-2; в) М-3; г) М-4; д) М-5

Наблюдаемое увеличение прочности сцепления может быть связано с тем, что при увеличении значения параметра $S_{общ}$ увеличивается

количество частиц заполнителя в смеси и, соответственно, вероятность их контакта с поверхностью стальной фибры. Используемая в работе

фибра имеет латунное покрытие с твердостью по шкале Мооса 3,5. При выдергивании фибры контактирующая с поверхностью волокна частица кварцевого песка с твердостью 7,0 будет царапать латунное покрытие, что приведет к увеличению максимальной нагрузки при выдергивании за счет увеличенной силы трения. Для подтверждения описанного механизма в работе [23] авторы использовали циркониевый песок с твердостью по шкале Мооса 7,5 взамен кварцевого, что привело к повышению прочности сцепления прямой латунированной стальной фибры на 30 %.

Были проведены микроскопические исследования поверхности стальной фибры до и после ее выдергивания из бетона с целью изучения степени повреждения поверхности. Для анализа были выбраны составы с матрицей М-2. На рисунке 4-а представлен снимок исходной фибры, на поверхности которой можно наблюдать небольшие продольные царапины, которые, вероятно, были образованы в процессе изготовления

волокна. После выдергивания фибры из бетона наблюдается появление более глубоких царапин по всей поверхности. При этом в составах, содержащих заполнитель (рисунок 4-в, г, д) степень повреждения выше по сравнению с фиброй, извлеченной из состава, в котором заполнитель отсутствует (рисунок 4-б). Это связано с увеличением значения параметра $S_{\text{общ}}$, что влечет за собой увеличение количества частиц заполнителя в смеси и более интенсивное царапание поверхности в процессе выдергивания волокна. Подобные микрофотографии были получены в работе [23] при испытании прямой фибры. Стоит также отметить, что при увеличении $S_{\text{общ}}$ с $6,2 \cdot 10^3$ до $12,4 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ внешний вид поверхности визуально практически не изменяется (рисунок 4-г и 4-д), что связано с насыщением контактной зоны частицами заполнителя и соответствует затухающему характеру изменения прочности, представленному диаграммах рисунка 3.

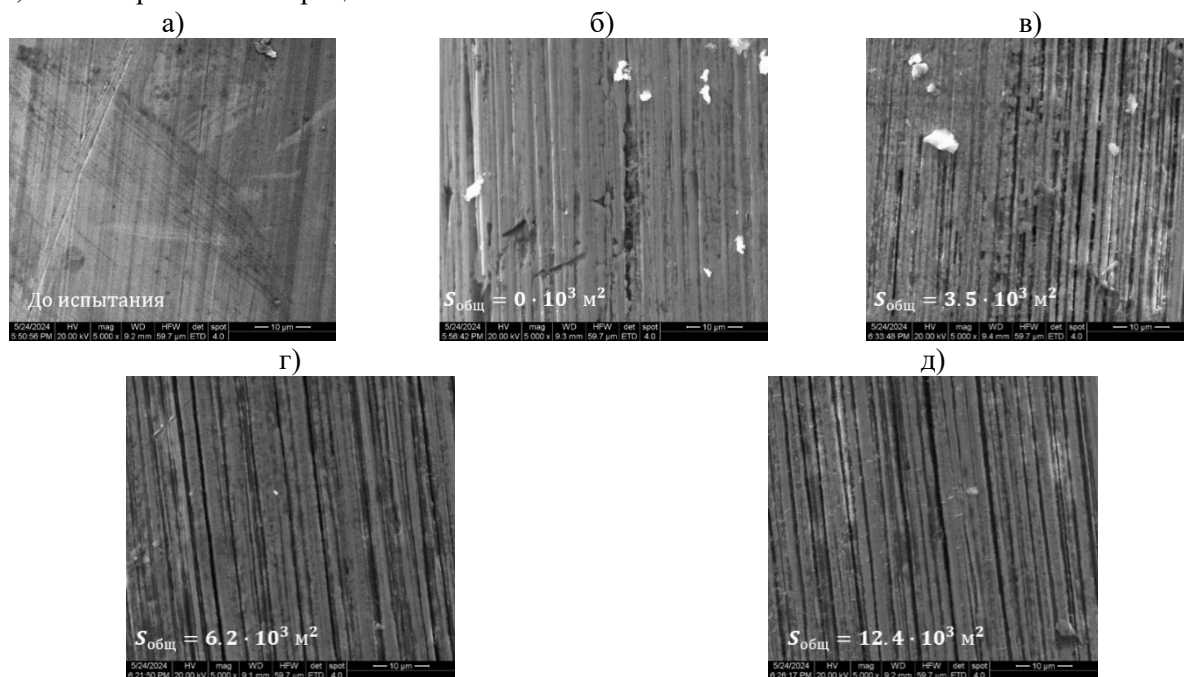


Рис. 4. Микрофотографии поверхности стальной фибры после выдергивания из бетона с матрицей М2:

- а) исходный образец до испытания; б) фибра, выдернутая из цементного камня ($S_{\text{общ}} = 0 \cdot 10^3 \text{ м}^2$);
 в) фибра, выдернутая из бетона с $S_{\text{общ}} = 3,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2$;
 г) фибра, выдернутая из бетона с $S_{\text{общ}} = 6,2 \cdot 10^3 \text{ м}^2$; д) фибра, выдернутая из бетона с $S_{\text{общ}} = 12,4 \cdot 10^3 \text{ м}^2$

Из диаграмм на рисунке 3 видно, что заполнитель по-разному влияет на сцепление фибры в зависимости от состава цементного камня. Для оценки интенсивности изменения прочности сцепления при различных значениях параметра $S_{\text{общ}}$ была рассчитана относительная прочность сцепления по формуле:

$$\tau_{f,rel} = \frac{\tau_{f,3}}{\tau_{f,0}}, \quad (8)$$

где $\tau_{f,3}$ – прочность сцепления фибры с бетоном, содержащим заполнитель, МПа;

$\tau_{f,0}$ – прочность сцепления фибры с цементным камнем, МПа;

На графиках рисунка 5-а представлены зависимость изменения относительной прочности сцепления от параметра $S_{\text{общ}}$ для всех испытанных составов. Экспериментальные данные были аппроксимированы экспоненциальной функцией вида:

$$\tau_{f,rel} = \tau_{f,m,rel} - (\tau_{f,m,rel} - 1) \cdot e^{-a \cdot S_{общ}} \quad (9)$$

где $\tau_{f,m,rel}$ – предельная относительная прочность сцепления вследствие увеличения параметра $S_{общ}$;

a – эмпирический коэффициент, $1/\text{м}^2$.

Из графиков рисунка 5-а видно, что зависимости изменения относительной прочности сцепления от параметра $S_{общ}$ носят асимптотический

характер, что означает наличие предельного значения прочности сцепления, которое достигается при насыщении ограниченного объема контактной зоны частицами заполнителя. В таблице 5 представлены значения предельной относительной прочности сцепления ($\tau_{f,m,rel}$), которые были найдены методом наименьших квадратов, а также прочности цементного камня при сжатии для каждой матрицы.

Таблица 5

Значения $\tau_{f,m,rel}$ уравнения 9 и прочности цементного камня при сжатии

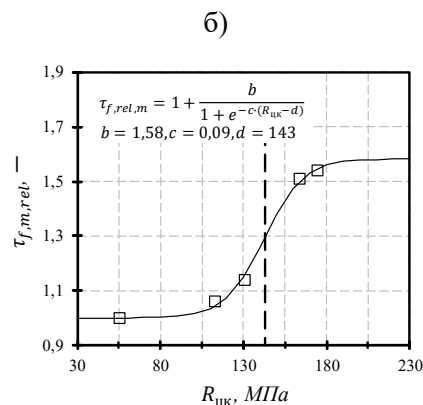
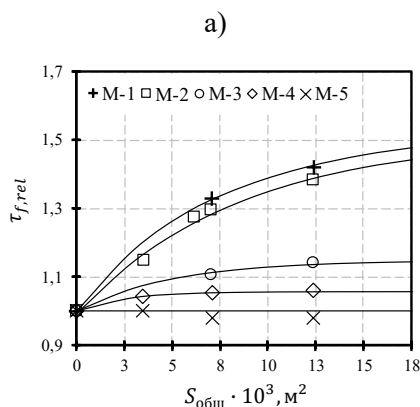
Параметр	M1	M2	M3	M4	M5
$\tau_{f,m,rel}$	1,54	1,51	1,15	1,06	1,00
$R_{цк}$, МПа	175,0	163,8	131,4	113,2	56,0

Была обнаружена тенденция к уменьшению значения $\tau_{f,m,rel}$ с уменьшением прочности цементного камня. Наибольший прирост прочности был обнаружен для составов с матрицей М-1 и М-2, которые имели самое низкое водоцементное соотношение и наибольшее содержание микрокремнезема. При увеличении В/Ц и снижении количества микрокремнезема наблюдается резкое снижение $\tau_{f,m,rel}$ с 1,51–1,54 до 1,00–1,15. На графике рисунка 5-б представлена зависимость изменения $\tau_{f,m,rel}$ от прочности цементного камня. Экспериментальные данные были аппроксимированы сигмоидальной функцией. Из графика можно заметить, что существует условное граничное значение прочности цементного

каменя, которое определяет максимальное значение $\tau_{f,m,rel}$: левее этой границы $\tau_{f,m,rel}$ практически не изменяется, правее границы происходит скачкообразный рост до определенной величины. Условное граничное значение, равное 143 МПа, было получено путем аппроксимации экспериментальных данных функцией следующего вида:

$$\tau_{f,m,rel} = 1 + \frac{b}{1 + e^{-c \cdot (R_{цк} - d)}} \quad (10)$$

где b , c , d – эмпирические коэффициенты. При этом коэффициент d определяет координату центра графика, которая была принята в качестве граничного значения прочности цементного камня.

Рис. 5. а) зависимость относительной прочности сцепления от параметра $S_{общ}$;

б) зависимость предельной относительной прочности сцепления от прочности цементного камня

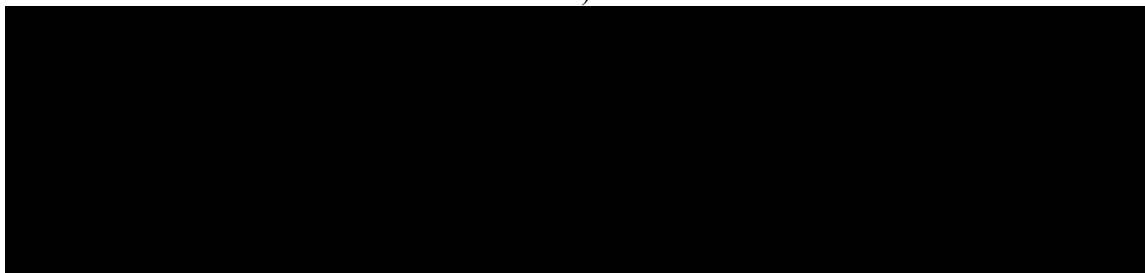
Был предложен механизм, объясняющий наличие граничного значения прочности цементного камня, который заключается в следующем. При выдергивании волновой фибры из бетона под отгибами волокна возникают зоны концентрации напряжений вследствие смятия цементного камня. Если прочность цементного камня более 143 МПа, то он способен воспринимать эти напряжения без разрушения. В результате заполнитель, контактирующий с поверхностью фибры,

вносит значительный вклад в прочность сцепления, так как реализуется полный контакт фибры с поверхностью бетона. Если значение прочности менее 143 МПа, происходит разрушение окружающего фибру цементного камня, в результате чего фибра проскальзывает, а заполнитель не вносит вклад в сопротивление выдергиванию фибры вследствие отсутствия контакта между ними.

Обосновать данное предположение можно аналитически. Для этого воспользуемся моделью фрикционного шкива, разработанной Д. М. Алваном [33] для моделирования выдергивания стальной анкерной фибры из бетона. Рассчитанные при помощи модели значения усилий хорошо согласуются с экспериментальными, полученными при выдергивании фибры как из сверхвысокопрочных бетонов, так и бетонов средней прочности [34–36]. Фибра представлена в виде шкивов, расположенных в местах изгибов

волокна, и веревки, перекинутой между ними, которые отображают прямые участки волокна (рисунок 6-а). Силы, действующие на систему, включают натяжение в прямых участках, T_i , силу трения в местах изгиба фибры, F_i , реакцию опоры, R_i , и вращательный компонент, F_{ph} , соответствующий силе для пластической деформации отгибов. Решение системы уравнений относительно значений T_i позволяет вычислить усилия, необходимые для выдергивания фибры с различным количеством отгибов.

а)



б)

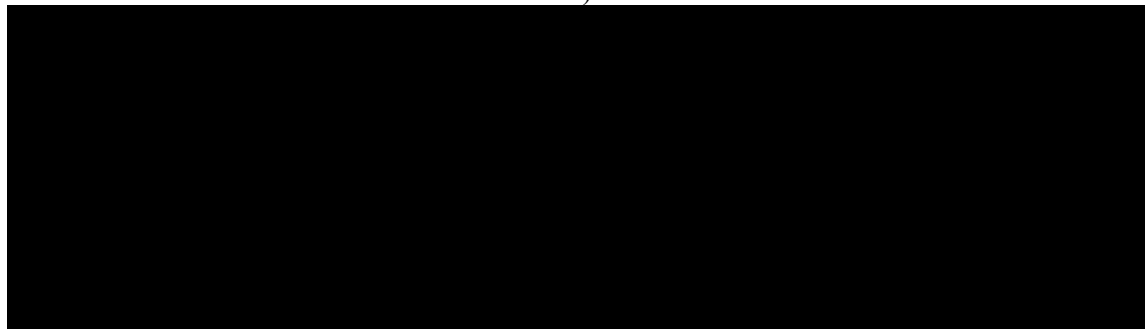


Рис. 6. Схематическое изображение: а) фибры в соответствии с моделью фрикционного шкива; б) зоны смятия цементного камня при выдергивании волновой фибры

Модель была адаптирована для используемой в данной работе фибры, в результате чего были получены уравнения для расчета усилий,

необходимых для выпрямления пластических шарниров (загибов) волновой стальной фибры:

$$T_1 = \frac{F_{ph}[3 \cdot (1 - \mu \cdot \cos \beta) + 2 \cdot \mu \cos \beta + 2 \cdot \mu \cdot (\cos \alpha + \cos \beta) \cdot (1 + \frac{\mu \cos \beta}{1 - \mu \cos \beta})]}{(1 - \mu \cos \beta)(1 - \mu \cos \alpha)} \quad [\text{Н}] \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{2 \cdot F_{ph} \cdot (1 + \frac{\mu \cos \beta}{1 - \mu \cos \beta})}{1 - \mu \cos \beta} \quad [\text{Н}] \quad (12)$$

$$T_3 = \frac{F_{ph}}{1 - \mu \cos \beta} \quad [\text{Н}] \quad (13)$$

где T_1 , T_2 и T_3 – усилия, необходимые для выпрямления трех, двух и одного загибов фибры, Н;

μ – коэффициент трения между поверхностью фибры и бетоном;

α , β – углы, принимаемые по схеме рисунка 6-а;

F_{ph} – усилие на пластическую деформацию отгиба, Н.

Значение F_{ph} определяется по следующей формуле:

$$F_{ph} = \frac{M_p}{d_f \cos \theta} \quad [\text{Н}] \quad (14)$$

где θ – угол, определяемый по схеме рисунка 6-а;

M_p – пластический момент фибры, Н · мм, который определяется как:

$$M_p = \frac{R_f \cdot \pi \cdot d_f^3}{12} \quad [\text{Н} \cdot \text{мм}] \quad (15)$$

где R_f – прочность фибры на растяжение, МПа.

Схематическое изображение диаграммы «нагрузка-смещение фибры» с формулами для расчета ключевых точек представлено на рисунке 7.

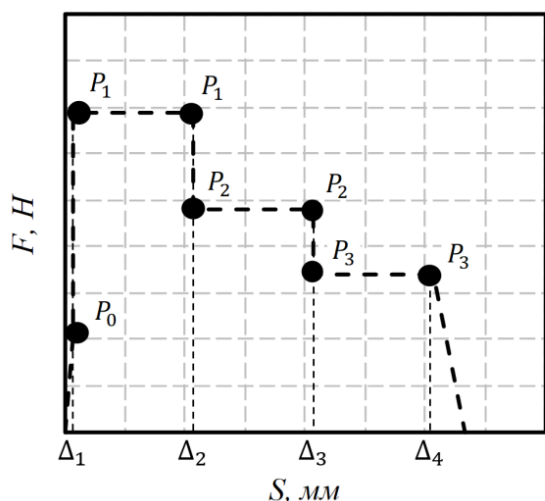


Рис. 7. Схематическое изображение диаграммы «нагрузка-смещение фибры» с формулами для расчета ключевых точек

Начало сдвига фибры происходит при нагрузке P_0 (рисунок 7), при которой происходит разрушение химических связей между поверхностью волокна и цементным камнем. При этом величина проскальзывания фибры в момент разрушения связей может быть приблизительно принята равной $0,05 \cdot l_{\text{раз}}$ [37], где $l_{\text{раз}}$ – длина развертки фибры, определяемая как сумма длин всех прямолинейных участков волокна ($l_i \cdot N$). Помимо длины развертки фибры для вычисления нагрузки P_0 необходимо знать прочность сцепления прямого участка, $\tau_{f,s}$, которая была определена по данным из литературных источников (таблица 6). Для моделирования были выбраны

матрицы М-2 и М-5 с одинаковым значением параметра $S_{\text{общ}} = 7,1 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. Для матрицы М-2 были использованы результаты прочности сцепления прямой фибры с бетонами с прочностью 140,0-152,5 МПа, для матрицы М-5 – 40,0-68,2 МПа. Значение коэффициента трения между сталью и бетоном, μ , может изменяться в диапазоне 0,3-0,5 [38]. Для расчетов было принято среднее значение из указанного диапазона. Значения углов α , β и θ (рисунок 6-а), определенные по результатам 60 измерений фактических размеров стальной фибры, составляют 79, 86 и 8°, соответственно.

Таблица 6

Значения прочности сцепления прямой фибры с бетонами различной прочности

№	R, МПа	$\tau_{f,s}$, МПа	$\tau_{f,s,ср}$, МПа	Источник
1	152,5	8,4	8,2	[37]
2	152,5	7,4		
3	152,5	6,2		
4	151,5	10,6		[39]
5	140,0	8,6		[40]
6	68,2	4,8	2,8	[41]
7	60,0*	2,2		[42]
8	49,1	2,2		[43]
9	40,0	2,1		[44]

Примечание: *значение получено по уравнению $R = A \cdot R_{ц} \cdot (Ц/В - 0,5)$ при $A = 0,6$ и $R_{ц} = 40 \text{ МПа}$

На графиках рисунка 8-а и 8-б представлены расчетные и экспериментальные диаграммы «нагрузка-смещение фибры» для матриц М-2 и М-5.

Рассчитанная по уравнениям 11, 14, 15 максимальная нагрузка при выдергивании фибры из матрицы М-2 составляет 173 Н, что хорошо со-

гласуется с экспериментально полученным средним значением 175 Н. Нисходящая ветвь диаграммы после пикового значения хотя и имеет схожее очертание с экспериментальной, но в абсолютных значениях нагрузки описывается менее точно, что может быть связано со срывом латунного покрытия с поверхности фибры и умень-

шением коэффициента трения μ , значение которого в расчете принимается постоянным на всех этапах выдергивания волокна. Отметим, что модель фрикционного шкива подразумевает наличие пластической деформации отгибов фибры в процессе ее выдергивания, приводящего к полному распрямлению волн. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений для матрицы М-2 говорит о том, что цементный камень под отгибами волокна способен выдержать передаваемое на него усилие без разрушения,

позволяя фибре пройти все этапы деформирования и полностью распрямиться. На графике рисунка 8-б представлена диаграмма, полученная при выдергивании фибры из матрицы М-5. Из рисунка видно, что модель дает завышенные значения, более чем в 2,5 раза переоценивая максимальное усилие при выдергивании. Данный факт может говорить о разрушении окружающего цементного камня, в результате чего фибра проскальзывает без пластической деформации и выдергивается из бетона с значительно меньшим усилием.

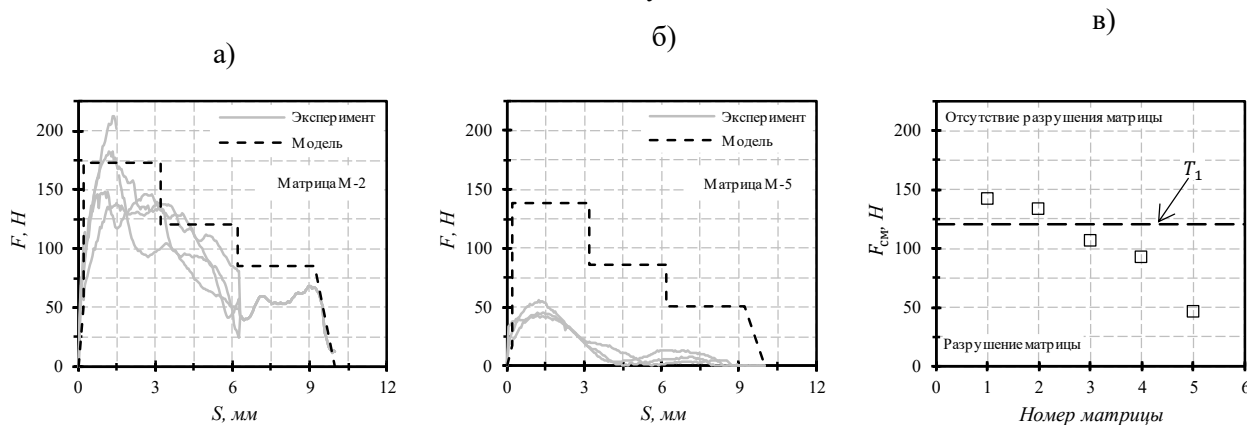


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования:

а) зависимость нагрузки выдергивания от смещения фибры для матрицы М-2;

б) зависимость нагрузки выдергивания от смещения фибры для матрицы М-5;

в) значения усилий, необходимых для смятия цементного камня, расположенного под волнами стальной фибры, полученные по уравнению 16

Разрушение, хотя бы частичное, цементного камня при выдергивании волновой фибры можно также показать, сравнив максимальное усилие смятия, которое цементный камень может выдержать (F_{cm}), и усилие, которое необходимо приложить, чтобы распрямить все отгибы волокна (T_1). Ф.Н. Рабиновичем была получена эмпирическая зависимость между условной прочностью при смятии бетона и его кубиковой прочностью: $R_{cm} = 2,5 \cdot R$ [45]. Используя данное выражение и зная высоту волны и диаметр фибры, можно определить максимальное усилие по формуле:

$$F_{cm} = n \cdot A \cdot R_{cm} = n \cdot d_f \cdot h \cdot R_{cm} \quad (16)$$

где n – число участков, под которыми цементный камень подвергается смятию (рисунок 6-б);

A – площадь приложения сминающей нагрузки, mm^2 ;

d_f, h – диаметр фибры и высота волны, соответственно, mm .

Рассчитанные по уравнению 16 значения F_{cm} представлены на графике рисунка 8-в. Для матриц М-1 и М-2 расчетные значения F_{cm} лежат выше значения T_1 , что говорит об отсутствии разрушения цементного камня и возможности полного распрямления волокна при выдергивании.

Для матриц М-3, М-4 и М-5 значения F_{cm} меньше T_1 , что говорит о полном или частичном смятии и раздроблении цементного камня, что приводит к выдергиванию фибры без деформации отгибов (или только частичной) и недоиспользованию ее потенциала. По фотографиям на рисунке 9 можно заметить, что расчетные данные хорошо соотносятся с фактически наблюдаемым внешним видом фибры: в случае, если соотношение $F_{cm}/T_1 > 1$, часть волокон, погруженная в бетон, полностью распрямляется; если $F_{cm}/T_1 < 1$, фибра сохраняет свою исходную форму. По уравнению 16 можно определить граничное значение прочности цементного камня, заменив F_{cm} на T_1 . Рассчитанное таким образом значение 148 МПа очень близко с значением 143 МПа, полученным по графику рисунка 5-б.

Таким образом, увеличение прочности сцепления стальной волновой фибры с бетоном при увеличении параметра $S_{общ}$ будет происходить только при условии отсутствия разрушения цементного камня под отгибами волокна, что обеспечивается при соблюдении неравенства $F_{cm} > T_1$. Это может быть достигнуто либо путем изменения геометрии и прочности стальной фибры, либо за счет повышения прочности цементного камня.

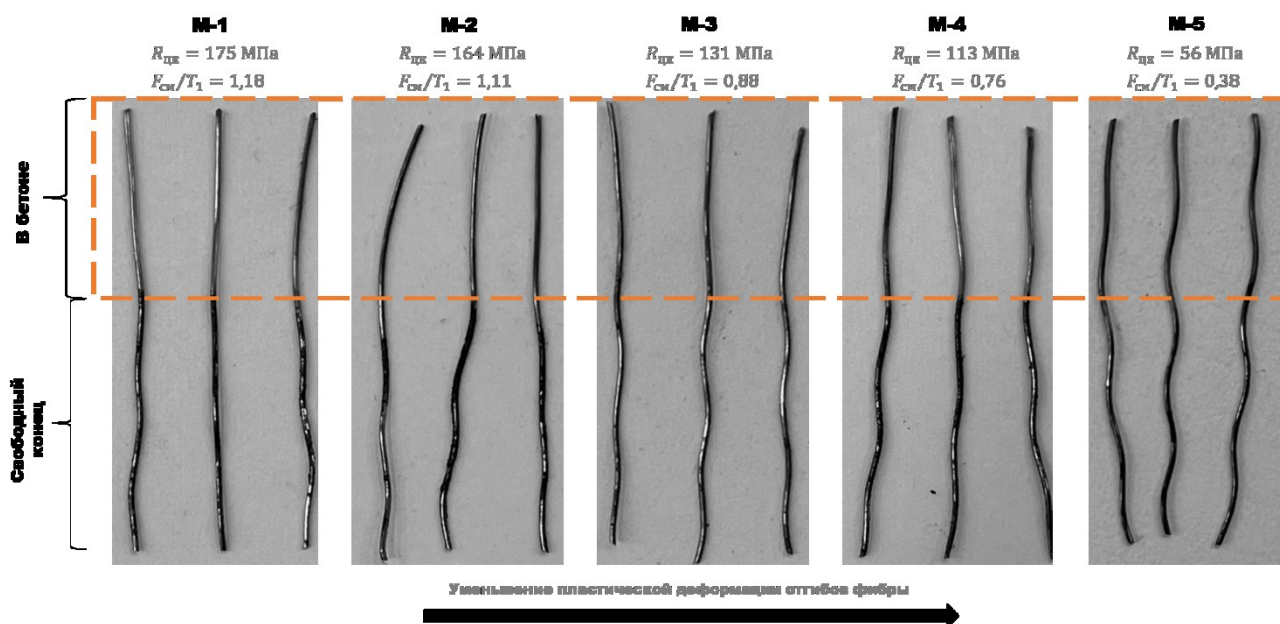


Рис. 9. Внешний вид стальной фибры после выдергивания из различных бетонных матриц

Одной из задач строительного материаловедения является разработка методов прогнозирования свойств материалов на основе их состава и характеристик сырьевых компонентов. Как отмечалось ранее, для фибробетонов прочность сцепления фибры с бетонной матрицей является одним из ключевых показателей, определяющих их поведение при осевом растяжении. Особенно важное значение этот показатель имеет именно для сверхвысокопрочных сталефибробетонов, так как прочность на растяжение относится к одним из основных преимуществ данного материала. Разработка расчетной модели, позволяющей прогнозировать прочность сцепления фибры с сверхвысокопрочным бетоном, является необходимым шагом на пути развития общего подхода к проектированию составов сверхвысокопрочных фибробетонов с заданным комплексом свойств.

Полученные экспериментальные данные позволяют выделить наиболее значимые факторы, влияющие на сцепление волновой фибры: прочность цементного камня, или качество его структуры, объемное содержание и размер частиц заполнителя. Для построения расчетной модели был введен дополнительный параметр, отражающий качество структуры цементного камня, φ , и учитывающий важнейшие рецептурные факторы, который определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{R_{ц}}{B/C_{эфф}}, [\text{МПа}] \quad (17)$$

где $R_{ц}$ – активность цемента, определяемая по ГОСТ 30744, МПа;

$B/C_{эфф}$ – эффективное водоцементное соотношение.

Эффективное водоцементное соотношение определяется с учетом содержания активной минеральной добавки в составе смешанного вяжущего и фактора эффективности добавки по следующему уравнению:

$$B/C_{эфф} = \frac{B/C}{1+p \cdot K_{эфф}}, \quad (18)$$

где B/C – водоцементное соотношение;

p – массовая доля активной минеральной добавки в составе смешанного вяжущего;

$K_{эфф}$ – фактор эффективности активной минеральной добавки.

Фактор эффективности минеральной добавки показывает, сколько килограмм цемента может быть заменено одним килограммом минеральной добавки без снижения прочности бетона. Методика определения фактора эффективности подробно представлена в работе [46]. В предыдущей работе авторов [47] была получена зависимость фактора эффективности микрокремнезема от его доли в составе вяжущего для высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов, которая имеет следующий вид:

$$K_{эфф} = -0,99 \cdot \ln(p) + 0,034 \quad (19)$$

Как следует из уравнений 17-19, на значение параметра φ влияют те же величины, что и на прочность при сжатии. Использование данного параметра взамен прочности для оценки качества структуры цементного камня мотивировано тем, что прочность материала является экспериментально полученной величиной и на ее значение влияют размер и форма образца [48], качество опорных поверхностей [49] и точность центровки образца на плите пресса. Значение двух последних

факторов имеют особое значение для сверхвысокопрочных бетонов, отличающихся хрупким характером разрушения. Таким образом, для одного и того же состава могут быть получены различные значения прочности, что затрудняет возможность объективной оценки структуры материала. Предлагаемый критерий φ является расчетной величиной и для большинства составов сверхвысокопрочных бетонов, содержащих микрокремнезем в качестве активной минеральной добавки, не тре-

бует проведения дополнительных экспериментальных работ и может быть принят в качестве инструмента для объективной оценки качества структуры.

Рассчитанные по уравнениям 17-19 значения параметра φ для испытанных составов бетонных матриц представлены в таблице 7, из которых видно, что они имеют тот же порядок значения, что и прочность цементного камня, представленная в таблице 5.

Таблица 7

Значения параметра φ для испытанных составов бетонных матриц

Параметр	М-1	М-2	М-3	М-4	М-5
φ	307	277	231	196	141

Уравнение для прогнозирования прочности сцепления получено при комбинировании формул 8 и 9:

$$\tau_f = \tau_{f,0} \cdot (\tau_{f,m,rel} - (\tau_{f,m,rel} - 1) \cdot e^{-a \cdot S_{общ}}) \text{ [МПа]} \quad (20)$$

Предельная относительная прочность сцепления, $\tau_{f,m,rel}$, определяется по уравнению 10, но с заменой переменной $R_{цк}$ на φ . При этом значения эмпирических коэффициентов изменятся и составят: $b = 0,54$, $c = 0,07$, $d = 226$.

Прочность сцепления волновой фибры с цементным камнем, $\tau_{f,0}$, зависит от параметра φ и определяется по формуле:

$$\tau_{f,0} = 0,016 \cdot \varphi + 10,3 \text{ [МПа]} \quad (21)$$

Значение коэффициента a уравнения 20 также находится в зависимости от параметра φ :

$$a = \frac{1}{0,06 \cdot \varphi - 7,9} \text{ [1/М}^2\text{]} \quad (22)$$

Представленные выше эмпирические уравнения позволяют определить прочность сцепления волновой фибры с учетом различных рецептурных факторов, включающих в себя как свойства вяжущего и активных минеральных добавок, так и концентрацию, и свойства заполнителя в составе бетонной матрицы. В научной литературе также имеют место уравнения, связывающие прочность сцепления стальной фибры с прочностью при сжатии бетонной матрицы [40]. Такой подход может считаться упрощенным, так как вид и концентрация кварцевого заполнителя практически не отражаются на прочности бетона при сжатии либо приводят к ее ухудшению [49, 50], в то время как прочность сцепления может быть увеличена до 42 %. По результатам проведенного исследования была получена следующая зависимость прочности сцепления волновой фибры от прочности при сжатии бетонной матрицы:

$$\tau_f = 0,11 \cdot R + 1,23 \text{ [МПа]} \quad (23)$$

На рисунке 10 представлен порядок расчета прочности сцепления стальной волновой фибры по расширенной модели (уравнения 17–22) и упрощенной (23), обозначенные как вариант 1 и 2, а также сравнение фактических и расчетных значений прочности, полученных с применением двух различных подходов. Отметим, что на графиках рисунка 10 не представлены результаты испытаний составов с матрицей М-5, так как они не относятся к классу сверхвысокопрочных бетонов.

Коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями прочности сцепления составляют 0,95 и 0,83 при использовании 1 и 2 варианта расчета, соответственно. Первый (расширенный) вариант модели дает более точные результаты: средняя и максимальная относительная погрешность составляет 4,5 и 11,4%, соответственно, в то время как у второго варианта – 6,8 и 30,5%, соответственно. Изображенный на рисунке 10 алгоритм предназначен для решения прямой задачи – определения прочности сцепления для материала заданного состава. Представленный подход также может быть использован и для решения обратной задачи – нахождения параметров смеси, например, водоцементного соотношения, для получения требуемой прочности сцепления.

Стоит также отметить, что полученные модели являются эмпирическими и справедливы только для волновой фибры с определенными геометрическими характеристиками. Для построения более полной модели, отражающий реальные физические явления, происходящие при выдергивании стальной фибры (пластическая дефо-

мация волокна, смятие цементного камня) необходимо проведение дополнительных испытаний

с другими типами волокон и уточнение полученных зависимостей.

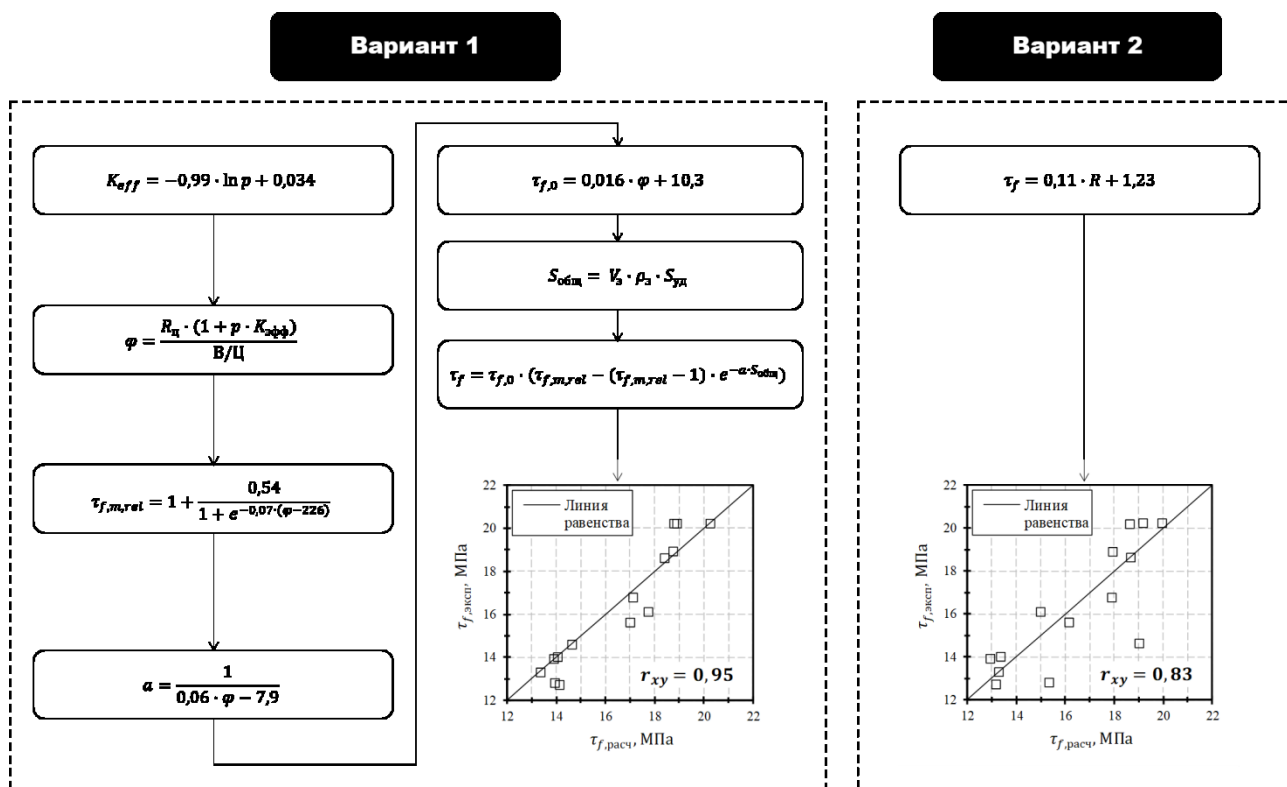


Рис. 10. Порядок расчета прочности сцепления волновой фибры с сверхвысокопрочным бетоном

Выводы. В работе представлены результаты определения прочности сцепления стальной волновой фибры с сверхвысокопрочным бетоном различного состава. По результатам проведения экспериментальных исследований и анализа полученных данных могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. В статье представлен новый рецептурный параметр, $S_{общ}$, отражающий общую площадь поверхности частиц заполнителя в составе бетонной смеси, при расчете которого учитывается как объемное содержание, так и размер частиц заполнителя. Установлено, что увеличение параметра $S_{общ}$ приводит к увеличению прочности сцепления стальной волновой фибры с бетоном до 42 % по сравнению с цементным камнем вследствие увеличения силы трения в контактной зоне, что было подтверждено образованием большего количества продольных царапин на поверхности стальной фибры;

2. Показано, что вклад параметра $S_{общ}$ в прочность сцепления волновой фибры обеспечивается только при условии отсутствия разрушения цементного камня под отгибами волокна. Аналитически было установлено, что при выдергивании волновой фибры с заданными геометрическими характеристиками цементный камень способен выдержать передаваемую на него нагрузку, если его прочность составляет 143-148

МПа. При значениях прочности цементного камня ниже указанных, происходит смятие цементного камня и потеря контакта между фиброй и окружающей цементной матрицей при ее выдергивании, в результате чего заполнитель не оказывает влияния на прочность сцепления.

3. Максимальная нагрузка при выдергивании волновой фибры достаточно точно может быть рассчитана при помощи модели фрикционного шкива при условии достаточной прочности цементного камня, обеспечивающей отсутствие его разрушения при выдергивании фибры;

4. Представлены уравнения для прогнозирования прочности сцепления волновой стальной фибры с сверхвысокопрочным бетоном в зависимости от различных рецептурных факторов, таких как: активность цемента, водоцементное соотношение, содержание микрокремнезема, а также размера частиц и объемной концентрации заполнителя. Среднее и максимальное относительное отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет 4,5 и 11,1 %, соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. № 260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844.

2. Sun X., Gong Z., Zuo Y., Hu J., Li Y., Wu H., Huang Z., Wang L. Flexural Behavior of the Hollow Slab Girders Strengthened with Ultra-High Performance Concrete: Field Full-Scale Experiment and Analysis // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 408. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133608.

3. Марченко М.С., Чилин И.А., Селютин Н.М. Опыт применения сверхвысокопрочного сталефибробетона в элементах усиления железобетонных конструкций // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. Том 30. № 3. С. 41–50. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(301-61-50).

4. Abellán-García J., Carvajal-Muñoz J.S., Ramírez-Munévar C. Application of Ultra-High-Performance Concrete as Bridge Pavement Overlays: Literature Review and Case Studies // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 410. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134221

5. Jiang H., Tu W., Li M., Liang W., Gao X. Flexural Performance of UHPC-Filled Narrow Joints between Precast Concrete Bridge Slabs // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03108.

6. Ren Z., Jia J., Li J., Hu M., Li B., Han Q., Du X. Shear Behavior of Precast Bridge Deck Panels with UHPC Wet Joints // Engineering Structures. 2024. Vol. 316. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118569.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Li V.C., Leung C.K.Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites // Journal of Engineering Mechanics. 1992. Vol. 118. Pp. 2246–2244. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246)

11. Cai Z.W., Yu J.T., Duan X.Z., Deng B.Y., Lu Z.D., Yu K.Q. Enhancing the strain-hardening performance of ultra-high performance concrete by tailoring matrix toughness and fiber parameters // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 395. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132335.

12. Naaman A.E. Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960 // Proceedings of international workshop on advanced construction materials. Berlin: Springer-Verlag, 2007. Pp. 181–202.

13. Pi Z., Xiao H., Du J., Li C., Cai W., Liu M. Effect of the water/cement ratio on the improvement of pullout behaviors using nano-SiO₂ modified steel fiber and the micro mechanism // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 338. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127632.

14. Abdallah S., Fan M., Zhou X. Pull-Out Behaviour of Hooked End Steel Fibres Embedded in Ultra-high Performance Mortar with Various W/B Ratios // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2017. Vol. 11. №. 2. Pp. 301–313. DOI: 10.1007/s40069-017-0193-8.

15. Wu Z., Shi C., Khayat K.H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC) // Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 71. Pp. 97–109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.005.

16. Yoo D.Y., Chun B., Jim J.J. Effect of calcium sulfoaluminate-based expansive agent on rate dependent pullout behavior of straight steel fiber embedded in UHPC // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 122. Pp. 196–211. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.021.

17. Wu Z., Shi C., Khayat K.H. Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO₃ particles // Cement and Concrete Composites. 2018. Vol. 86. Pp. 255–265. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.11.014.

18. Wu Z., Khayat K.H., Shi C. Effect of nano-SiO₂ particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete // Cement and Concrete Research. 2017. Vol. 95. Pp. 247–256. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.031.

19. Choi H.J., Oh T., Yoo D.Y. Enhancing fiber-matrix interfacial bond in ultra-high-performance concrete containing titanium dioxide // Materials Letters. 2020. Vol. 280. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128547.

20. Kim J.J. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 103. Pp. 213–223. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006.

21. Chun B., Kim S., Yoo D.Y. Benefits of chemically treated steel fibers on enhancing the interfacial bond strength from ultra-high-performance concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123519.

22. Chun B., Yoo D.Y., Banthia N. Achieving slip-hardening behavior of sanded straight steel fibers in ultra-high-performance concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103669.
23. 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. 451–461.
24. Qi J., Yao Y., Wang J., Han F., Lv J. Effect of Sand Grain Size and Fibre Size on Macro-Micro Interfacial Bond Behaviour of Steel Fibres and UHPC Mortars // *Magazine of Concrete Research*. 2021. Vol. 73. Pp. 228–239. DOI: 10.1680/jmacr.19.00099.
25. Wille K., Loh K.J. Nanoengineering Ultra-High-Performance Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes // *Transportation Research Record*. 2010. Vol. 2142. Pp. 119–126. DOI: 10.3141/2142-18.
26. Kang S.H., Kim J.J., Kim D.J., Chung Y.S. Effect of Sand Grain Size and Sand-to-Cement Ratio on the Interfacial Bond Strength of Steel Fibers Embedded in Mortars // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. Pp. 1421–1430. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.064.
27. Igarashi S., Bentur A., Mindess S. The Effect of Processing on the Bond and Interfaces in Steel Fiber Reinforced Cement Composites // *Cement and Concrete Composites*. 1996. Vol. 18. Pp. 312–322. DOI: 10.1016/0958-9465(96)00022-4.
28. Соловьев В.Г., Матюшин Е.В. Методика проектирования составов ультра высокофункциональных бетонов с заданной подвижностью // *Техника и технология силикатов*. 2020. Т. 27. № 4. С. 107–113.
29. 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.
30. Chen X., Wu S., Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38. Pp. 804–812. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058.
31. Chen J.J., Kwan A.K.H., Ng P.L., Li L.G. Packing Density Improvement through Addition of Limestone Fines, Superfine Cement and Condensed Silica Fume // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2016. Vol. 4. Pp. 29–36. DOI: 10.4236/msce.2016.47005.
32. Stang H. Significance of shrinkage-induced clamping pressure in fiber-matrix bonding in cementitious composite materials // *Advanced Cement Based Materials*. 1996. Vol. 4. №. 3-4. Pp. 106–115. DOI: 10.1016/S1065-7355(96)90079-6.
33. Alwan J., Naaman A., Guerrero P. Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices // *Concrete Science and Engineering*. 1999. Vol. 1. Pp. 15–25.
34. Wille K., Naaman A. Pullout Behavior of High-Strength Steel Fibers Embedded in Ultra-High-Performance Concrete // *ACI Materials Journal*. 2012. Vol. 109. №. 4. Pp. 479–488.
35. Wang X., Xu B., Luan K., Mu R., Chen J. Optimization of the Shape of Hooked-End Steel Fiber Based on Pulling Out and Reinforcing Cementitious Composites // *Materials*. 2024. Vol. 17. DOI: 10.3390/ma17010047.
36. Abdallah S., Fan M., Rees D.W.A. Analysis and modelling of mechanical anchorage of 4D/5D hooked end steel fibres // *Materials & Design*. 2016. Vol. 112. Pp. 539–552. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.107.
37. Yoo D.Y., Park J.J., Kim S.W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber // *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.064.
38. Liu Y., Huang Y. Analytic solution of pull-out failure on bond-slip relationship between deformed rebar and ultra-high-performance concrete // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 305. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117682.
39. Qi J., Wu Z., Ma Z.J., Wang J. Pullout behavior of straight and hooked-end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 191. Pp. 764–774. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.067.
40. 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.
41. Le H.V., Moon D., Kim D.J. Effects of ageing and storage conditions on the interfacial bond strength of steel fibers in mortars // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170. Pp. 129–141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.064.
42. Pompo A., Stupak P.R., Marchese B. Analysis of Steel Fibre Pull-Out from a Cement Matrix Using Video Photography // *Cement and Concrete Composites*. 1996. Vol. 18. № 1. Pp. 3–8. DOI: 10.1016/0958-9465(95)00034-8.
43. Deng F., Ding X., Chi Y., Xu L., Wang L. The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling // *Composite Structures*. 2018. Vol. 206. Pp. 693–712. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.08.066.
44. Shannag M.J., Brincker R., Hansen W. Pullout behavior of steel fibers from cement-based

composites // Cement and Concrete Research. 1997. Vol. 27. №. 6. Pp. 925–936. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00061-6.

45. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. М: Издательство АСВ, 2004. 560 с.

46. Wong H.S., Razak H.A. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Pp. 696–702.

47. 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. № 10. DOI:10.3390/buildings13102591.

48. Graybeal B., Davis M. Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. ACI Materials Journal. 2008. Vol. 105. №. 6. 603–609.

49. Matiushin E., Sizyakov I., Shvetsova V., Soloviev V. The Properties and Behavior of Ultra-High-Performance Concrete: The Effects of Aggregate Volume Content and Particle Size // Buildings. 2024. Vol. 14. № 9. DOI: 10.3390/buildings14092891.

50. Соловьев В.Г., Матюшин Е.В., Веселов В.К. Изучение влияния вида и объемного содержания заполнителя на свойства сверхвысокопрочного мелкозернистого бетона // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 4. С. 317–325.

Информация об авторах

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

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.

Поступила 16.11.2024 г.

© Матюшин Е.В., Соловьев В.Г., 2025

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

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

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

INFLUENCE OF AGGREGATE ON THE BOND STRENGTH OF CORRUGATED STEEL FIBER WITH ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Abstract. The article examines the effect of the volume content and particle size of the aggregate on the bond strength of corrugated steel fiber to ultra-high performance concrete of various compositions. The study was conducted by pulling out a single fiber from concretes with a compressive strength in the range of 56–175 MPa with a volume concentration of aggregate from 0 to 0.4 m³/m³ and a maximum particle size of 0.4–0.8 mm.

It was found that the bond strength of corrugated steel fiber depends on the parameter S_{tot} , reflecting the total surface area of the aggregate in the composition, the calculation of which uses both the volume concentration and the particle size of the aggregate. Test results indicate that the bond strength can be increased to 42 % by changing the parameter S_{tot} from 0 to 12.4·10³ m². The contribution of the aggregate to the bonds strength is only observed if there is no destruction of the cement paste under the fiber bends. Analytical investigations revealed that cement paste with a compressive strength of 143–146 MPa is capable of withstanding the force generated by fiber pullout without deteriorating. The contribution of the aggregate to the bond strength is either minimal or completely absent if the strength of cement paste is lower than the specified value.

Empirical equations were obtained for predicting the bond strength of corrugated steel fiber, taking into account various mix design parameters, including cement compressive strength, water-cement ratio, silica fume content, volume concentration and particle size of the aggregate. The average and maximum relative error between the calculated and experimental values were between 4.5 and 11.1 %, respectively.

Keywords: ultra-high performance concrete, steel fiber, corrugated fiber, bond strength, aggregate particle size, aggregate volume.

REFERENCES

1. 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. No 260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844.
2. Sun X., Gong Z., Zuo Y., Hu J., Li Y., Wu H., Huang Z., Wang L. Flexural Behavior of the Hollow Slab Girders Strengthened with Ultra-High Performance Concrete: Field Full-Scale Experiment and Analysis *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 408. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133608.
3. Marchenko M., Chilin I., Selyutin N. Experience in using ultra high performance fiber reinforced concrete elements [Opyt primeneniya sverhvyso-koprochnogo stalefibrobetona v elementah usileniya zhelezobetonnykh konstrukcij]. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021. Vol. 30. No. 3. Pp. 41–50. DOI: 10.37538/2226-9696-2021-3(301-61-50 (rus)).
4. Abellán-García J., Carvajal-Muñoz J.S., Ramírez-Munévar C. Application of Ultra-High-Performance Concrete as Bridge Pavement Overlays: Literature Review and Case Studies. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 410. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134221.
5. Jiang H., Tu W., Li M., Liang W., Gao X. Flexural Performance of UHPC-Filled Narrow Joints between Precast Concrete Bridge Slabs. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03108.
6. Ren Z., Jia J., Li J., Hu M., Li B., Han Q., Du X. Shear Behavior of Precast Bridge Deck Panels with UHPC Wet Joints. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 316. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2024.118569.
7. 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.
8. Wille K., Kim D.J., Naaman A.E. Strain-Hardening UHP-FRC with Low Fiber Contents. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 2011. Vol. 44. Pp. 583–598. DOI: 10.1617/s11527-010-9650-4.
9. 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.
10. Li V.C., Leung C.K.Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*. 1992. Vol. 118. Pp. 2246–2244. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246).
11. Cai Z.W., Yu J.T., Duan X.Z., Deng B.Y., Lu Z.D., Yu K.Q. Enhancing the strain-hardening performance of ultra-high performance concrete by tailoring matrix toughness and fiber parameters. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 395. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132335.
12. Naaman A.E. Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960 / *Proceedings of international workshop on advanced construction materials*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. Pp. 181–202.
13. Pi Z., Xiao H., Du J., Li C., Cai W., Liu M. Effect of the water/cement ratio on the improvement of pullout behaviors using nano-SiO₂ modified steel fiber and the micro mechanism. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 338. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127632.
14. Abdallah S., Fan M., Zhou X. Pull-Out Behaviour of Hooked End Steel Fibres Embedded in Ultra-high Performance Mortar with Various W/B Ratios. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2017. Vol. 11. No. 2. Pp. 301–313. DOI: 10.1007/s40069-017-0193-8.
15. Wu Z., Shi C., Khayat K.H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 71. Pp. 97–109. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.005.
16. Yoo D.Y., Chun B., Jim J.J. Effect of calcium sulfoaluminate-based expansive agent on rate dependent pullout behavior of straight steel fiber embedded in UHPC. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 122. Pp. 196–211. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.021.
17. Wu Z., Shi C., Khayat K.H. Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO₃ particles. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 86. Pp. 255–265. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.11.014.
18. Wu Z., Khayat K.H., Shi C. Effect of nano-SiO₂ particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 95. Pp. 247–256. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.031.
19. Choi H.J., Oh T., Yoo D.Y. Enhancing fiber-matrix interfacial bond in ultra-high-performance concrete containing titanium dioxide. *Materials Letters*. 2020. Vol. 280. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128547.
20. Kim J.J. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 103. Pp. 213–223. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006.

21. Chun B., Kim S., Yoo D.Y. Benefits of chemically treated steel fibers on enhancing the interfacial bond strength from ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 294. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123519.
22. Chun B., Yoo D.Y., Banthia N. Achieving slip-hardening behavior of sanded straight steel fibers in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 113. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103669.
23. 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. 451–461.
24. Qi J., Yao Y., Wang J., Han F., Lv J. Effect of Sand Grain Size and Fibre Size on Macro-Micro Interfacial Bond Behaviour of Steel Fibres and UHPC Mortars. *Magazine of Concrete Research*. 2021. Vol. 73. Pp. 228–239. DOI: 10.1680/jmacr.19.00099.
25. Wille K., Loh K.J. Nanoengineering Ultra-High-Performance Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes. *Transportation Research Record*. 2010. Vol. 2142. Pp. 119–126. DOI: 10.3141/2142-18.
26. Kang S.H., Kim J.J., Kim D.J., Chung Y.S. Effect of Sand Grain Size and Sand-to-Cement Ratio on the Interfacial Bond Strength of Steel Fibers Embedded in Mortars. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. Pp. 1421–1430. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.064.
27. Igarashi S., Bentur A., Mindess S. The Effect of Processing on the Bond and Interfaces in Steel Fiber Reinforced Cement Composites. *Cement and Concrete Composites*. 1996. Vol. 18. Pp. 312–322. DOI: 10.1016/0958-9465(96)00022-4.
28. Soloviev V.G., Matiushin E.V. Methodology for designing compositions of ultra-high performance concrete with a given flowability [Metodika proektirovaniya sostavov ul'tra vysokofunkcional'nyh betonov s zadannoj podvizhnost'yu]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2020. Vol. 27. No. 4. Pp. 107–113 (rus).
29. Soloviev V.G., Matiushin E.V. Mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete with different types of steel fiber [Mekhanicheskie svoystva sverhвысокопрочного фибробетона s razlichnymi vidami stal'noj fibry]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 9. Pp. 26–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-26-39 (rus).
30. Chen X., Wu S., Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38. Pp. 804–812. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058
31. Chen J.J., Kwan A.K.H., Ng P.L., Li L.G. Packing Density Improvement through Addition of Limestone Fines, Superfine Cement and Condensed Silica Fume. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2016. Vol. 4. Pp. 29–36. DOI: 10.4236/msce.2016.47005.
32. Stang H. Significance of shrinkage-induced clamping pressure in fiber-matrix bonding in cementitious composite materials. *Advanced Cement Based Materials*. 1996. Vol. 4. No. 3-4. Pp. 106–115. DOI: 10.1016/S1065-7355(96)90079-6.
33. Alwan J., Naaman A., Guerrero P. Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices. *Concrete Science and Engineering*. 1999. Vol. 1. Pp. 15–25.
34. Wille K., Naaman A. Pullout Behavior of High-Strength Steel Fibers Embedded in Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*. 2012. Vol. 109. No. 4. Pp. 479–488.
35. Wang X., Xu B., Luan K., Mu R., Chen J. Optimization of the Shape of Hooked-End Steel Fiber Based on Pulling Out and Reinforcing Cementitious Composites. *Materials*. 2024. Vol. 17. DOI: 10.3390/ma17010047.
36. Abdallah S., Fan M., Rees D.W.A. Analysis and modelling of mechanical anchorage of 4D/5D hooked end steel fibres. *Materials & Design*. 2016. Vol. 112. Pp. 539–552. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.107.
37. Yoo D.Y., Park J.J., Kim S.W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber. *Composite Structures*. 2017. Vol. 174. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.064.
38. Liu Y., Huang Y. Analytic solution of pull-out failure on bond-slip relationship between deformed rebar and ultra-high-performance concrete. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 305. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117682.
39. Qi J., Wu Z., Ma Z.J., Wang J. Pullout behavior of straight and hooked-end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 191. Pp. 764–774. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.067.
40. 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.
41. Le H.V., Moon D., Kim D.J. Effects of ageing and storage conditions on the interfacial bond strength of steel fibers in mortars. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170. Pp. 129–141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.064.
42. Pompo A., Stupak P.R., Marchese B. Analysis of Steel Fibre Pull-Out from a Cement Matrix

Using Video Photography. Cement and Concrete Composites. 1996. Vol. 18. No 1. Pp. 3–8. DOI: 10.1016/0958-9465(95)00034-8.

43. Deng F., Ding X., Chi Y., Xu L., Wang L. The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling. Composite Structures. 2018. Vol. 206. Pp. 693–712. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.08.066.

44. Shannag M.J., Brincker R., Hansen W. Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites. Cement and Concrete Research. 1997. Vol. 27. No. 6. Pp. 925–936. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00061-6.

45. Rabinovich F.N. Composites based on fiber-reinforced concrete. Issues of theory and design, technology, structures: Monograph [Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii: Monografiya] – M: Publishing house ASV, 2004. 560 p. (rus).

46. Wong H.S., Razak H.A. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Pp. 696–702.

47. 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.

48. Graybeal B., Davis M. Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. ACI Materials Journal. 2008. Vol. 105. No. 6. 603–609.

49. Matiushin E., Sizyakov I., Shvetsova V., Soloviev V. The Properties and Behavior of Ultra-High-Performance Concrete: The Effects of Aggregate Volume Content and Particle Size. Buildings. 2024. Vol. 14. No 9. DOI: 10.3390/buildings14092891.

50. Soloviev V.G., Matiushin E.V., Veselov V.K. Study of the influence of the type and volumetric content of aggregate on the properties of ultra-high performance fine-grained concrete [Izuchenie vliyaniya vida i ob'emnogo soderzhaniya zapolnitelya na svoystva sverkhvysokoprochnogo melkozernistogo betona]. Tekhnika i tekhnologiya silikatov. 2022. Vol. 29. No. 4. Pp. 317–325. (rus)

Information about the authors

Matiushin, Evgenii V., Lecturer, Postgraduate Student at the Department of Building Materials Science. E-mail: matyushinev@mgsu.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Soloviev, Vadim G. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Building Materials Science. E-mail: s_vadim_g@mail.ru. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26.

Received 16.11.2024

Для цитирования:

Матюшин Е.В., Соловьев В.Г. Влияние заполнителя на прочность сцепления стальной волновой фибры с сверхвысокопрочным бетоном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 8–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-4-8-26

For citation:

Matiushin E.V., Soloviev V.G. Influence of aggregate on the bond strength of corrugated steel fiber with ultra-high performance concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 8–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-4-8-26

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-27-34

^{1,*}Абайдуллина Т.Н., ²Строкова В. В., ¹Тимоховец В.Д., ¹Рафеев Е.С.¹Тюменский индустриальный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: abajdullinatn@tyui.ru

АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ КОЛЕИ В АСФАЛЬТОБЕТОНАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Аннотация. Автомобильные дороги являются одной из важных инфраструктурных составляющих, характеризующих степень развития как отдельных регионов, так и государства в целом. В этой связи весьма актуальными становятся вопросы, связанные с обеспечением работоспособности существующих и вновь строящихся дорог. Одной из серьезных проблем при решении данной задачи является преждевременный износ верхних слоев покрытий, который формируется в основном под влиянием истирающих воздействий автомобильных шин, оснащенных шипами. Данная проблема особенно актуальна в климатических реалиях нашей страны. Анализ причин формирования колеи износа позволил установить, что важным фактором являются характеристики применяемых материалов в составе асфальтобетона. В статье представлены результаты испытаний асфальтобетонных покрытий разных типов, изготовленных с применением щебня из различных горных пород, на истираемость. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на результат истираемости асфальтобетона оказывает влияние не только вид горной породы, из которой изготовлен щебень, но также и его крупность. Наилучшие результаты истираемости получены для асфальтобетона типа ЩМА-22, содержащего в своем составе щебень фр. 16–22,4 мм карьера «Гора Змеевая», фр. 8–16 мм, фр. 4–8 мм Баженовского месторождения, дробленого песка Чернореченского месторождения, минерального порошка марки МП-2 и модифицированного битума.

Ключевые слова: колея, абразивный износ, щебень, асфальтобетон, истираемость.

Введение. Преждевременное разрушение покрытий автомобильных дорог связано в основном с увеличением доли автомобильного транспорта в общем объеме грузоперевозок и повышением нагрузок на ось автомобиля. Результатом этого является образование и накопление деформаций, появление дефектов в виде выбоин и трещин, а также образование колеи в результате абразивного износа структурных элементов асфальтобетона. Деформация покрытий автомобильных дорог связана во многом с недостаточной теплостойкостью битумного вяжущего. Она формируется под воздействием многократно повторяющегося воздействия движущегося транспорта, при котором на начальном этапе возникают микродефекты покрытия, затем эти дефекты увеличиваются и в итоге покрытие приходит в состояние, недопустимое с точки зрения его безопасной эксплуатации. Для борьбы с этим видом деформации известны многочисленные методы, основным из которых является повышение деформативной устойчивости асфальтобетона путем применения в его составе полимерных добавок - модификаторов битума [1]. Другим видом деформирования покрытия является образование колеи в результате абразивного износа структурных элементов асфальтобетона под действием автомобильных шин, оснащенных шипами. Данная проблема особенно актуальна для нашей страны, большая часть которой расположена в

северных широтах и при наступлении отрицательных температур и формировании снежного покрова использование шипованных шин является необходимой мерой обеспечения безопасности движения. Такие условия могут продолжаться в некоторых регионах страны до 6–8 месяцев, результатом является преждевременный износ асфальтобетона в верхних слоях дорожных покрытий [2–6]. Износ верхнего слоя асфальтобетонного покрытия на дорогах с разным уровнем интенсивности движения колеблется в довольно широких пределах – от 5 до 10 и более мм в год. Действующими в РФ нормативными документами износ дорожных покрытий шипованной резиной практически не учитывается, отсутствуют методики прогнозирования данного износа, а также требования к износостойкости покрытий автомобильных дорог разных технических категорий. Проблема образования колеи особенно актуальна для проектировщиков, строителей, эксплуатирующих организаций и владельцев автомобильных дорог, которые отличаются высокой интенсивностью движения и расположенных в I или II дорожно-климатических зонах и в высокогорных районах.

Целью данной работы являлось исследование и оценка глубины колеи при абразивном износе шипованными шинами автомобилей в ас-

фальтобетонах различных типов. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) провести анализ факторов, приводящих к образованию колеи износа;
- 2) изучить способы предотвращения образования колеи износа;
- 3) оценить влияние исходных материалов и вида асфальтобетона на величину колеи износа при различных комбинациях материалов.

Группой ученых из скандинавских стран [7] были систематизированы данные по образованию колеи износа, в результате чего удалось сгруппировать факторы, влияющие на скорость и глубину образующейся колеи. К числу таких

факторов можно отнести: интенсивность движения и состав транспортного потока, структуру асфальтобетона, вид применяемого вяжущего, прочность и износостойкость щебня и дробленого песка в асфальтобетоне, твердость исходной горной породы, максимальный номинальный размер крупного заполнителя и др. [8–12] На представленной диаграмме (рис. 1) наглядно показано влияние свойств исходных материалов и состава асфальтобетонной смеси на износ асфальтобетона дорожных покрытий при их эксплуатации. Как видно из приведенных данных, существенный вклад в образование колеи износа вносит характеристика применяемого щебня и битума.

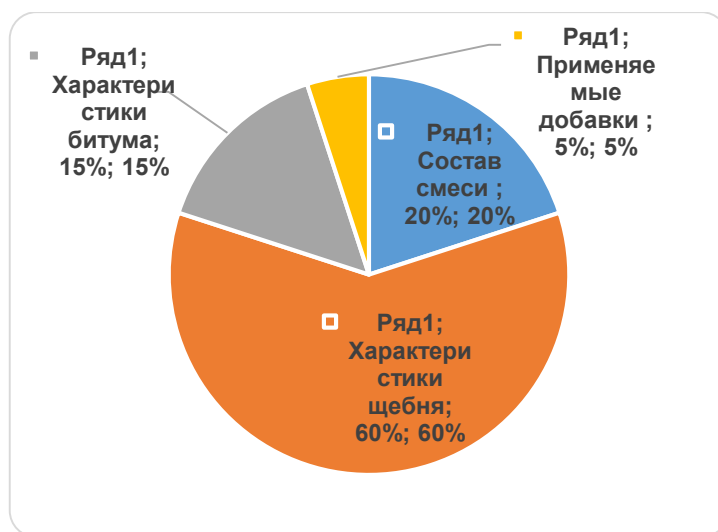


Рис. 1. Влияние свойств исходных материалов и состава смеси на образование колеи в асфальтобетоне

Материалы и методика. На начальном этапе определяли скорость и глубину формирования колеи износа на асфальтобетонах различных типов, поэтому в качестве объектов исследования были выбраны горячий асфальтобетон типа А16Вт, щебеночно-мастичный асфальтобетон типов ЩМА-16 и ЩМА-22. Стойкость к образованию колеи оценивали по показателю истираемости, определение которого производили на установке УКМП-РДТ в соответствии с ГОСТ Р 58406.5. Сущность метода заключается в определении потери объема испытуемого образца диаметром $(100,0 \pm 2,0)$ мм и толщиной $(30,0 \pm 1,0)$ мм, подвергнутого истирающему воздействию стальных шаров в количестве 40 шт. при температуре $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение (15 ± 1) мин. Данный метод моделирует воздействие шипованной резины в зимний период на асфальтобетонное покрытие, является аналогом Праль-теста, применяемого в европейских странах для оценки износа асфальтобетона под воздействием стальных шаров в присутствии воды на поверхности образцов.

Для приготовления асфальтобетонных смесей применяли щебень Баженовского месторождения и карьера Гора Змеевая, расположенных в Свердловской области. Щебень Баженовского месторождения получают из горной породы перидотит, которая относится к группе глубинных ультраосновных пород. Условия образования и химический состав данной породы определяют ее основные свойства, которые характерны также для щебня, полученного из нее, а именно: высокая прочность на сжатие, износостойкость и морозостойкость. Щебень карьера Гора Змеевая представлен в основном горной породой габбро, для которой кроме аналогичных перидотиту свойств характерна высокая твердость и, следовательно, низкая истираемость. Поэтому было принято решение приготовить асфальтобетонные смеси с различными комбинациями применяемого щебня (таблица 1). Мелкий заполнитель во всех смесях – доломитовый дробленый песок. Минеральный порошок марки МП-2 – известняковый неактивированный. Для всех используемых материалов характерно хорошее сцепление

с битумом, что не требует применения адгезионных добавок и положительно сказывается на эксплуатационных свойствах асфальтобетона. В качестве вяжущего во всех смесях был использован вязкий нефтяной битум марки БНД 100/130 АО

«Газпромнефть – Омский НПЗ». Для предотвращения расслоения щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей использовали стабилизирующую добавку Стилобит. Характеристики щебня и дробленого песка приведены в таблицах 2–3.

Таблица 1

Составы асфальтобетонных смесей для оценки истираемости асфальтобетона

Состав №1, асфальтобетонной смеси А16Вт							
Щебень фр. 4-8, 8-16 мм – карьер Гора Змеевая							
Песок дробленый – Чернореченское месторождение							
Минеральный порошок МП-2 Северо-Богдановичское месторождение известняков							
Битум нефтяной дорожный вязкий БНД 100/130							
Состав №2, асфальтобетонной смеси А16Вт							
Щебень фр. 8-16 мм – карьер Гора Змеевая							
Щебень фр. 4-8 мм – Баженовское месторождение							
Песок дробленый – Чернореченское месторождение							
Минеральный порошок МП-2 Северо-Богдановичское месторождение известняков							
Битум нефтяной дорожный вязкий БНД 100/130							
Состав №3, щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь ЦМА-16							
Щебень фр. 4-8, 8-16 мм – карьер Гора Змеевая							
Песок дробленый – Чернореченское месторождение							
Минеральный порошок МП-2 Северо-Богдановичское месторождение известняков							
Битум нефтяной дорожный вязкий БНД 100/130							
Стабилизирующая добавка Стилобит							
Состав №4, щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь ЦМА-16							
Щебень фр. 8-16 мм – карьер Гора Змеевая							
Щебень фр. 4-8 мм – Баженовское месторождение							
Песок дробленый – Чернореченское месторождение							
Минеральный порошок МП-2 Северо-Богдановичское месторождение известняков							
Битум нефтяной дорожный вязкий БНД 100/130							
Стабилизирующая добавка Стилобит							
Состав №5, щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь ЦМА-22							
Щебень фр. 4-8, 8-16, 16-22,4 мм – Баженовское месторождение							
Песок дробленый – Чернореченское месторождение							
Минеральный порошок МП-2 Северо-Богдановичское месторождение известняков							
Битум нефтяной дорожный вязкий БНД 100/130							
Стабилизирующая добавка Стилобит							
Состав №6, щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь ЦМА-22							
Щебень фр. 16-22,4 мм – карьер Гора Змеевая							
Щебень фр. 4-8, 8-16 мм – Баженовское месторождение							
Песок дробленый – Чернореченское месторождение							
Минеральный порошок МП-2 Северо-Богдановичское месторождение известняков							
Битум нефтяной дорожный вязкий БНД 100/130							
Стабилизирующая добавка Стилобит							

Таблица 2

Физико-механические характеристики применяемого щебня

№ п/п	Характеристика	Баженовское месторождение			Карьер Гора Змеевая		
		Фр. 4-8 мм	Фр. 8-16 мм	Фр. 16-22,4 мм	Фр. 4-8 мм	Фр. 8-16 мм	Фр. 16-22,4 мм
1	Марка по зерновому составу	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10	90/10
2	Марка по дробимости	1400	1400	1400	1400	1400	1400
3	Сопротивление дроблению и износу	И1	И1	И1	И1	И1	И1
4	Сцепление битума с поверхностью щебня, балл	5	5	5	5	5	5

Таблица 3

Физико-механические характеристики дробленого песка

№ п/п	Характеристика	
1	Вид горной породы	доломит
2	Модуль крупности	2,95
3	Марка по дробимости	1200
4	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	8,5

Характеристики применяемого битума марки БНД 100/130: глубина проникания иглы при 25 °С – 103 мм⁻¹; температура размягчения – 45,4 °С, растяжимость при 0 °С – 5,4 см. Свойства

полимерно-битумного вяжущего марки ПБВ 90: глубина проникания иглы при 25 °С – 98 усл.град., температура размягчения – 61,5 °С, температура хрупкости – минус 27 °С, эластичность – 91 %.

Приготовление асфальтобетонных смесей производили в лабораторном смесителе, температура смеси составляла 140–160 °С. При этой температуре динамическая вязкость битума находилась в пределах 150–190 МПа·с.

Основная часть. Из полученных смесей формовали стандартные образцы-цилиндры диаметром 101,6 мм на компакторе Маршалла 50 ударами уплотнительного молота, на которых затем определяли физические и эксплуатационные свойства асфальтобетона (таблица 4).

Таблица 4

Физические и эксплуатационные свойства асфальтобетона

№ п/п	Физико-механические показатели	№ состава					
		1	2	3	4	5	6
1	Объемная плотность, г/см ³	2,580	2,464	2,620	2,590	2,462	2,520
2	Содержание воздушных пустот, %	3,1	3,3	3,2	3,5	3,0	3,2
3	Средняя глубина колеи, мм	3,0	2,9	3,3	3,2	3,0	3,1
4	Коэффициент водостойкости	0,86	0,87	0,87	0,91	0,86	0,88

Полученные результаты показывают, что свойства асфальтобетонов различных типов соответствуют требованиям нормативных документов, независимо от применяемых в их составе исходных материалов. При этом содержание воздушных пустот в асфальтобетоне находится в

пределах от 3,0 до 3,5 %. Далее образцы асфальтобетона испытывали на истираемость.

Результаты определения истираемости асфальтобетона приведены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты определения истираемости асфальтобетона

№ состава	Тип асфальтобетона	Истираемость, см ³	Класс по истираемости	Требования ГОСТ Р 58406.1-2020, 58406.2-2020
1	A16Bт	25	1	До 25
2	A16Bт	31	2	От 26 до 35
3	ЩМА-16	24	1	До 25
4	ЩМА-16	26	2	От 26 до 35
5	ЩМА-22	30	2	От 26 до 35
6	ЩМА-22	22	1	До 25

На основании анализа полученных данных (таблица 5) можно провести ранжирование исследуемых асфальтобетонов по эффективности их сопротивления образованию и накоплению колеи износа: состав №6 → состав №3 → состав №1 → состав №4 → состав №5 → состав №2. При этом по значению уменьшения объема все испытанные образцы показывают класс по истираемости от 1 до 2.

Наименьшей истираемостью обладает асфальтобетон типа ЩМА-22 (состав № 6), что, вероятно, подтверждает предположение о повышенной износостойкости данного типа асфальтобетона. Это объясняется, возможно, тем, что в состав данного асфальтобетона входит щебень фр.

16–22,4 мм из горной породы габбро. Полученные результаты подтверждают утверждение о том, что чем выше размер зерен щебня, применяемого в асфальтобетоне, тем выше его стойкость к износу. Внешний вид образцов до и после испытания на истираемость, изготовленных из щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-22, показан на рисунке 2.

Дальнейшие исследования проводились на щебеночно-мастичном асфальтобетоне типа ЩМА-22. Определяли влияние вида вяжущего на интенсивность образования колеи в асфальтобетоне. Дополнительно была приготовлена асфальтобетонная смесь ЩМА-22 состава №6 с поли-

мерно-битумным вяжущим ПБВ 90 с целью изучения влияния вида вяжущего на интенсивность образования колеи износа. Испытания образцов на истираемость показали класс по истираемости 1, при этом среднее уменьшение объема образцов составило 20 см³. Данные результаты подтверждают более высокую стойкость к износу асфальтобетона с модифицированным битумом в его составе. Коэффициент водостойкости асфальтобетона составил 0,89, что свидетельствует о высокой стойкости вяжущего к агрессивному воздействию воды и объясняется, по-видимому, более прочным сцеплением модифицированного битума со щебнем и наличием эластичности у модифицированного битума. По итогам проведенного исследования установлен оптимальный состав щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-22, обладающего повышенной стойкостью к образованию колеи износа:

Щебень фр. 16-22,4 мм, карьер «Гора Змеевая»	44 %
Щебень фр. 8-16 мм, карьер «Гора Змеевая»	18 %
Щебень фр. 4-8 мм, карьер «Гора Змеевая»	10 %
Песок дробленый, месторождение «Чернореченское»	20 %
Минеральный порошок МП-2, Северо-Богдановичское месторождение известняков	8 %
Полимерно-битумное вяжущее ПБВ 90, АО «Газпромнефть – Омский НПЗ»	6,4 %
Стабилизирующая добавка Стиллит,	0,4 %

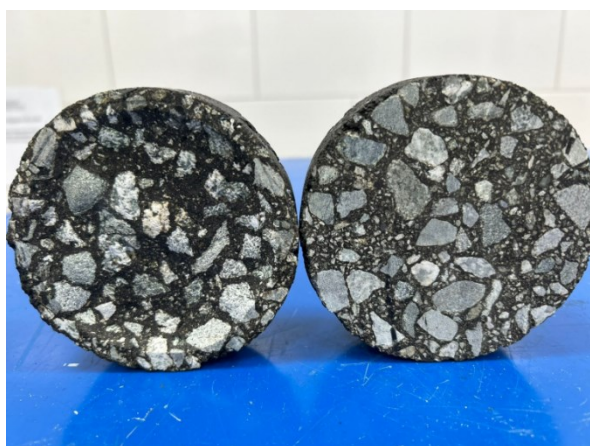


Рис. 2. Образцы ЩМА-22 до и после испытания на истираемость

Опытные участки из щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-22 были выполнены при ремонте городских улиц в г.Тюмень в 2023 году. Также с целью наблюдения за образованием колеи на участках торможения и разгона (перекрестки, остановки общественного транспорта)

при ремонте этих участков локально был использован щебеночно-мастичный асфальтобетон типа ЩМА-22. Эксплуатация опытных участков в течение года показала частичное обнажение зерен крупного заполнителя, при этом ровность покрытия не изменилась, зазор под 3-х метровой рейкой отсутствовал.

Поиск путей снижения интенсивности образования колеи износа на автомобильных дорогах позволит нормировать данный показатель в проектной документации и на стадии проектирования автомобильных дорог прогнозировать возможный срок их эксплуатации до достижения предельного состояния, недопустимого по условиям обеспечения безопасности дорожного движения [13–15].

Выводы:

1. Физические и эксплуатационные свойства исследуемых асфальтобетонов соответствуют требованиям действующих нормативных документов. При этом значение показателя «Содержание воздушных пустот» находится в диапазоне от 3,0 до 3,5 % для всех типов. Показатель истираемости испытанных образцов асфальтобетона имеет минимальное значение для составов №1,3 и 6. Это, вероятно, объясняется тем, что в этих асфальтобетонах в качестве структурообразующих фракций применен щебень из горной породы габбро, которая более эффективно сопротивляется истирающим воздействиям.

2. Асфальтобетон, изготовленный с применением полимерно-битумного вяжущего ПБВ 90, показал результат повышенной стойкости к износу и водостойкости в сравнении с аналогичным асфальтобетоном, приготовленным на нефтяном битуме марки БНД 100/130.

3. Наблюдение за образованием и развитием колеи на опытных участках необходимо продолжить. На основании полученных результатов будет возможно разработать зависимости, описывающие динамику развития глубины колеи под действием истирающих воздействий для прогнозной оценки сроков службы верхних слоев дорожных покрытий.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00796, <https://rscf.ru/project/23-19-00796/> с использованием оборудования Центра высоких технологий на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, а также оборудования на базе Испытательной лаборатории Акционерного общества «Тюменское областное дорожно-эксплуатационное предприятие».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмадова Х.Х., Хадисова Ж.Т., Махмудова Л.Ш., Абдулмежидова З.А., Мусаева М.А.

Основные способы модификации битумов различными добавками // Вестник ГГНТУ. Технические науки, Том XV, №3 (17). 2019. С. 42–56.

2. Тимоховец В.Д., Бабич Т.Г. Определение величины износа дорожного покрытия // Construction and Geotechnics. 2024. Том 15, № 1. С. 33–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.03.

3. Леднев А.В. Анализ факторов, влияющих на износостойкость асфальтобетона // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2018. № 1. С. 1–10.

4. Blab R., Kappl K., Lackner R., Aigner E. Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements // Evaluation of test methods and prediction models. Samaris D28. 2006. Vol. 1. Pp. 144–152.

5. Johannes G. Investigations of Road Wear Caused by Studded Tires // Tire Science and Technology. 2014. Vol. 42(1). Pp. 2–15.

6. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 45–57.

7. Износ асфальтобетонных покрытий шипованной резиной [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dor.spb.ru/index/technology/iznos-pokrytiy/> (дата обращения: 22.12.2024).

8. Радовский Б.С. Концепция вечных дорожных одежд // Дорожная техника. 2011. № 11. С. 132–144.

9. Баймухаметов Г.Ф. Новые методы абразивных испытаний в дорожном строительстве // Техника и технология транспорта. 2019. № 11. С. 22–26.

10. Стягов А.С. Анализ зарубежных методов испытаний асфальтобетонных верхних слоев покрытия // Известия РГСУ. 2015. № 19. С. 208–214.

11. Хафизов Э.Р., Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф., Фомин А.Ю., Буланов П.Е., Никметзянов А.Р. Определение интенсивности движения и состава потока на улично-дорожной сети г. Казани в рамках исследования образования дефектов на дорожных покрытиях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2. С. 297–304.

12. Хафизов Э.Р., Шамсиев Д.И., Баймухаметов Г.Ф. Мониторинг глубины колеи на автомобильных дорогах г. Казань // Фундаментальные и прикладные науки сегодня. Материалы XX международной научно-практической конференции. 2019. С. 107–109.

13. Torbjörn J., Lars-Göran W. Utveckling och uppgradering av prognosmodell för beläggningsslitage från dubgade däck samt en kunskapsöversikt över inverkande faktorer. Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2007. VTI notat 07-2007. Version 3.2.03.

14. Сектор А.Г. Износ асфальтобетонных покрытий автомобильными шинами с шипами // Дорожная техника. 2017. С. 44–53.

15. Bahadori A., Zhang K., Li X., Muhunthan B. Development of asphalt materials to mitigate sdudded tire wear of pavements // Washington State University, California State University, Chico, California State University, Fresno. Final Report. 2017. 43 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.23938.02243

Информация об авторах:

Абайдуллина Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов. E-mail: abajdullinatn@tyui.ru. Тюменский индустриальный университет. Россия, 625000, г.Тюмень, ул. Володарского, д.38.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: vvstrokova@gmail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Тимоховец Вера Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов. E-mail: timohovetsvd@tyuiu.ru. Тюменский индустриальный университет. Россия, 625000, г.Тюмень, ул. Володарского, д.38.

Рафеева Екатерина Сергеевна, студент кафедры автомобильных дорог и аэродромов. E-mail: Rafeeva.Kate@yandex.ru. Тюменский индустриальный университет. Россия, 625000, г.Тюмень, ул. Володарского, д.38.

Поступила 17.02.2025 г.

© Абайдуллина Т.Н., Строкова В. В., Тимоховец В.Д., Рафеева Е.С., 2025

^{1,*}Abaidullina T.N., ²Strokova V.V., ¹Timokhovets V.D., ¹Rafeikova E.S.¹Industrial University of Tyumen²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: abajdullinatn@tyui.ru

INTENSITY ANALYSIS OF RUTTING IN VARIOUS TYPES OF ASPHALT CONCRETE

Abstract. Highways are one of the important infrastructure components that characterize the development level of regions and the state. In this regard issues related to ensuring the operability of existing and newly built roads become very relevant. One of the serious problems in solving this issue is premature wear of the pavement upper layers which is formed mainly under the influence of abrasive effects of automobile tires equipped with studs. This problem is especially relevant in the climatic realities of our country. Analysis of the causes of wear track formation allowed us to establish that an important factor is the material's characteristics in the asphalt concrete composition. The article presents the tests results of different types of asphalt concrete made using crushed stone from various rocks for abrasion. The results obtained allow us to conclude that the result of asphalt concrete abrasion is influenced not only by the type of rock from which the crushed stone is made but also by its size. The best results of abrasion were obtained for asphalt concrete of the stone mastic asphalt SMA-22 containing crushed stone of fraction 16-22.4 mm from the quarry "Gora Zmeevaya", fraction 8-16 mm, fraction 4-8 mm from the Bazhenovskoye deposit, crushed sand from the Chernorechenskoye deposit, mineral powder of the grade MP-2 and modified bitumen.

Keywords: rut, abrasive wear, crushed stone, asphalt concrete, abrasion.

REFERENCES

1. Ahmadova H.H., Hadisova Z.H.T., Mahmudova L.SH., Abdulmezhidova Z.A., Musaeva M.A. Basic bitumen modification methods various additives [Osnovnye sposoby modifikatsii bitumov razlichnymi dobavkami]. Herald of GSTOU. Technical Sciences. Volume XV. No. 3 (17). 2019. Pp. 42-56. (rus)
2. Timohovec V.D., Babich T.G. Determination of road surface wear and tear [Opredelenie velichiny iznosa dorozhnogo pokrytiya]. Construction and Geotechnics. 2024. Vol. 15. No. 1. Pp. 33-45. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.1.03. (rus)
3. Lednev A.V. Analysis of factors influencing the wear resistance of asphalt concrete [Analiz faktorov, vliyayushchih na iznosostojkost' asfal'tobetona]. Engineering journal of Don. No. 1. 2018. (rus)
4. Blab R., Kappl K., Lackner R., Aigner E. Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements. Evaluation of test methods and prediction models Samaris D28. 2006. Vol. 1. Pp. 144.
5. Gultlinger, Johannes, et al. 2014. Investigations of Road Wear Caused by Studded Tires. Tire Science and Technology. 2014. Vol. 42, 1. Pp. 2-15.
6. Gercog V.N., Dolgih G.V., Kuzin N.V. Calculation criteria for road pavement evenness. Part 1: substantiating the flatness standards of asphalt concrete pavement [Raschet dorozhnyh odezhd po kriteriyam rovnosti. CHast' 1. Obosnovanie norm rovnosti asfal'tobetonnyh pokrytij]. Magazine of Civil Engineering. No.5. 2015. Pp. 45-57. DOI: 10.5862/MCE.57.4. (rus)
7. Wear of asphalt concrete pavements by studded tires [Iznos asfal'tobetonnyh pokrytij shipovannykh rezinoj]. AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.dor.spb.ru/index/technology/iznos-pokrytij/> (date of treatment: 22.12.2024). (rus)
8. Radovskij B.S. Concept of eternal road pavements [Koncepciya vechnyh dorozhnyh odezhd]. Dorozhnaya tekhnika. 2011. No. 11. Pp. 132-144. (rus)
9. Bajmuhametov G.F. New methods of abrasion test in the road building [Novye metody abraziynykh ispytaniy v dorozhnom stroitel'stve]. Technique and technology of transport. 2019. No. №11. Pp. 22-26. (rus)
10. Styagov A.S. Analysis of foreign test methods for asphalt concrete of the upper layers of the coating [Analiz zarubezhnyh metodov ispytaniy asfal'tobetonov verkhnih sloev pokrytiya]. News of the RSSU. 2015. No. 19. Pp. 208-214 (rus)
11. Hafizov E.R., Vdovin E.A., Mavliev L.F., Fomin A.YU., Bulanov P.E., Nikmetzyanov A.R. Determination of the volume of traffic and speed of movement on the street-road network in Kazan in the framework of the study of a formation of defects on road surfaces [Opredelenie intensivnosti dvizheniya i sostava potoka na ulichno-dorozhnoy seti g. Kazani v ramkah issledovaniya obrazovaniya defektov na dorozhnyh pokrytyah]. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2017. No. 2. Pp. 297-304. (rus)
12. Khafizov E.R., Shamsiev D.I., Baimukhametov G.F. Monitoring the rut depth on the roads of Kazan [Monitoring glubiny kolei na avtomobil'nyh dorogah g. Kazan']. Fundamental'nye i prikladnye nauki segodnya. Materialy HKH mezhdunarodnoj

nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. Pp. 107–109. (rus)

13. Torbjörn J., Lars-Göran W. Utveckling och uppgradering av prognosmodell för beläggningsslitage från dubbade däck samt en kunskapsöversikt över inverkande faktorer. Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). 2007. VTI notat 07-2007. Version 3.2.03.

14. Sektor A. G. Wear of asphalt concrete pavements by studded car tires [Iznos asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyimi shinami s shipami]. Dorozhnaya tekhnika. 2017. Pp. 44–53. (rus)

15. Bahadori A. Zhang K., Li X., Development of asphalt concrete materials to reduce the wear of road surfaces due to tire impacts. University of Washington, California State University, Chico, California State University, Fresno. The final report. 2017. 43 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.23938.02243

Received 17.02.2025

Для цитирования:

Абайдуллина Т.Н., Строкова В. В., Тимоховец В.Д., Рафейкова Е.С. Анализ интенсивности образования колеи в асфальтобетонах различных типов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 27–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-27-34

For citation:

Abaidullina T.N., Strokov V.V., Timokhovets V.D., Rafeikova E.S. Intensity analysis of rutting in various types of asphalt concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 27–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-27-34

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-35-41

¹Фролова М.А., ²Лесовик В.С., ^{1,*}Дроздюк Т.А.¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: t.drozdyuk@narfu.ru

ВЛИЯНИЕ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ АКТИВНОСТЬ ПЛАСТИФИКАТОРА МИНЕРАЛЬНОЙ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ САПОНИТСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ

Аннотация. Пластифицирующие добавки, представляющие собой поверхностно-активные вещества, широко применяются при производстве бетонных смесей с целью снижения водоцементного отношения и в то же время сохранения необходимой подвижности бетонной смеси. Существуют различные классы таких добавок, механизм действия которых может различаться, но обусловлен протеканием общей стадии, связанной с адсорбцией молекул пластификатора на поверхности клинкерных минералов. При протекании этой стадии высвобождается часть воды, которая и обеспечивает пластифицирующий эффект. Механизм действия пластификатора на основе водного раствора ПАВ определяется его поверхностной активностью. Добавление в ПАВ дополнительного компонента может изменять величину поверхностной активности раствора. В этом плане особый интерес представляет сапонитсодержащий материал (отход алмазодобывающей промышленности), способный проявлять высокую адсорбционно-десорбционную активность в тонкодисперсном состоянии. Для изучения влияния сапонитсодержащего материала на свойства пластифицирующей добавки в водные растворы пластификатора добавляли высокодисперсный сапонитсодержащий порошок и определяли поверхностную активность полученных растворов. Было установлено, что добавление в водный раствор пластификатора активного высокодисперсного сапонитсодержащего порошка с удельной поверхностью не менее 1500 м²/кг позволяет на порядок увеличить поверхностную активность пластифицирующей добавки.

Ключевые слова: сапонитсодержащий материал, пластификатор, поверхностная активность, высокодисперсный порошок, водоцементное отношение.

Введение. В настоящее время пластифицирующие добавки различных классов, представляющие собой поверхностно-активные вещества, широко применяются в строительстве и позволяют за счет снижения водоцементного отношения сохранять необходимую подвижность бетонной смеси [1–3]. Известно, что механизм их действия может различаться [4–7], но обусловлен протеканием общей начальной стадии, связанной с моно- или полимолекулярной адсорбцией ПАВ (молекул пластификатора) на поверхности клинкерных минералов и гидросиликатных новообразований. При этом обеспечивается декомпозиция агрегатов на частицы, высвобождается большая часть заблокированной воды, обеспечивающей пластифицирующий эффект. Кроме того, водные адсорбционные слои способны уменьшать коэффициент трения между частицами бетонной смеси. Данный механизм действия пластификатора на основе водного раствора ПАВ определяется его поверхностной активностью, которая равна производной поверхностного натяжения (σ) по концентрации (c) поверхностно-активного вещества ($-d\sigma/dc$) [8]. Величина этого показателя (при прочих постоянных условиях применения) зависит от природы ПАВ (его химического строения). Классическое определение поверхностной активности дифильных молекул ПАВ основано на изучении процесса их адсорбции на границе

раздела жидкость (вода) – газ, а в качестве измеряемого информационного параметра используется поверхностное натяжение жидкой фазы (σ). Вместе с тем, используя композицию ПАВ с дополнительно вводимым в раствор компонентом [9], обладающим специфическими свойствами можно изменять величину $-d\sigma/dc$, придавая таким образом пластификатору, например, свойства суперпластификатора. В этом плане определенный интерес может быть связан с использованием сапонитсодержащего материала (ССМ), выделенного из суспензии оборотной воды процесса обогащения кимберлитовых руд [10].

Сапонитсодержащее сырье представляет собой вскрышную породу, образующуюся как побочный продукт в результате добычи алмазов на Ломоносовском ГОКе АО «Севералмаз», которое расположено в 100 км от города Архангельска. Состав слагающих трубку пород в основном представлен глинистым минералом – сапонитом, который в обводненном состоянии складывается в специальные хвостохранилища (прудовые отстойники) до 4 млн. тонн в год. Общие запасы сапонита – 68 млн т. (только на трубке Архангельская). Месторождений сапонитовых глин в Российской Федерации больше нет. Наиболее целесообразным способом утилизации большого количества накопленных техногенных отходов является их использование в качестве компонента

строительных материалов различного функционального назначения. Эффективность такого подхода доказана многочисленными исследованиями, направленными на создание минеральных композиций с использованием сапонитсодержащего материала (ССМ) – многотоннажного отхода горнодобывающей промышленности.

Необходимо отметить, что в настоящее время решение задачи, связанной с поиском новых направлений промышленного использования сапонитсодержащего отхода, является перспективным направлением исследований. Известно, что сапонитсодержащий материал используют в основном в качестве связующего и сорбирующего материала, он является активной минеральной добавкой в бетонные смеси; накоплен опыт применения сапонита в сельском хозяйстве. Однако данные направления практического применения не могут решить проблему накопления сапонитового отхода, который ежегодно складывается в виде водной суспензии. Кроме того, необходимо также сослаться на Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года", существенно усиливающий значимость экологической повестки в стране и требует, в том числе, снижения объемов отходов промышленных предприятий, направляемых на полигоны [10].

Известно, что ССМ, обладая уникальным строением кристаллической решетки [11], способен проявлять высокую адсорбционно-десорбционную активность в тонкодисперсном состоянии по отношению к водным растворам [12, 13]. Кристаллическое строение минерала (сапонита) заключается в наличии трехслойного слоистого пакета. Его структура представлена двумя слоями кремнекислородных тетраэдров с расположенными между ними алюмокислородными октаэдрическими слоями: в первом слое расположены атомы кислорода, во втором – атомы кремния, а в третьем слое, в области вершин тетраэдров, находятся гидроксильные группы. Пространство между слоями можно рассматривать в качестве микропор. Такие особенности пористой структуры сапонита позволяют отнести его к слоистым силикатам с расширяющейся структурной ячейкой с высокой дисперсностью, ярко выраженной сорбционной способностью и гидрофильностью. Связь между слоями обусловлена силами Ван-дер-Ваальса, что дает возможность проводить достаточно легко механоактивацию сырья с последующей модификацией полученного высокодисперсного порошка.

Слоистое строение сапонита и возможность его интеркалирования при погружении в рас-

творы за счет ионного обмена межслоевых катионов на более крупные интеркалируемые агенты (в виде как органических, так и неорганических веществ), позволяет гибко и рационально проектировать размер, форму и химическую функциональность микропор минерала с сохранением исходной структуры, что влияет на адсорбционные свойства готового продукта [13]. Поэтому введение данного минерального компонента в состав пластифицирующей добавки позволит управлять концентрационным параметром ПАВ, регулируя таким образом его поверхностную активность. Данное положение является сутью рабочей гипотезы исследований, а цель представленной работы заключается в ее экспериментальной проверке.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальной работы использовался универсальный пластификатор Пласбетон (страна производства Россия). Этот пластификатор широко применяется в качестве добавки к бетону, железобетону, к бетонным элементам конструкций и других бетонных изделий. В качестве минеральной добавки в пластификатор использовали сапонитсодержащий материал, выделенный методом электролитной коагуляции (электролит-коагулянт – водный раствор $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ с концентрацией 10^{-3} моль/л) из оборотной воды процесса обогащения кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (Архангельская область). После выделения и сушки (до постоянной массы при 105 ± 5 °С в сушильном шкафу Binder FD53) ССМ проводился рентгенофлюоресцентный анализ образцов для определения минерального состава. Далее сапонитсодержащий материал подвергался механическому измельчению в планетарной шаровой мельнице Retsch PM100 в течение 40 минут при скорости вращения ротора 420 об/мин в карбидвольфрамовой размольной гарнитуре. Удельную поверхность полученного минерального порошка измеряли методом газопроницаемости Козени-Кармана на приборе ПСХ-10а, исходное значение (ди измельчения) удельной поверхности составило $232 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Установлено, что в элементном составе пробы ССМ преобладают кремний (51,99 %), магний (22,59 %), железо (14,90 %), алюминий (4,32 %), которые составляют трехслойную структуру пакета сапонита, а также кальций (3,51 %) и калий (1,63 %), входящие в состав сапонита в качестве межслоевых обменных катионов. Кроме того, в пробе отмечено присутствие примесей титана, никеля и стронция, возможно сорбированных поверхностью сапонита.

Для определения величины поверхностной активности водных растворов пластификатора и

водных растворов пластификатора с добавлением ССМ, проводили измерение поверхностного натяжения методом «висячей капли» на тензиометре DSA20 Easy Drop фирмы Kruss. С помощью программного обеспечения прибора автоматически фиксировалась форма капли и измерялось поверхностное натяжение исследуемого раствора с погрешностью 1 %. Измерения проводились в течение первых 15–30 секунд после перемешивания растворов при температуре 20 °С. Для определения поверхностного натяжения и дальнейшего расчета поверхностной активности пластификатора готовились его водные растворы с содержанием пластификатора от 0 до 100 % (по объему) с шагом 10 %. Для изучения влияния ССМ на пластифицирующие свойства в водные растворы с содержанием пластификатора 20 и 80 % (по объему) добавляли предварительно подготовленный вышеописанным способом ССМ в количестве от 1 до 5 г (с шагом в 1 г) на 100 мл раствора.

Основная часть. Известно, что эффективность пластификаторов-ПАВ зависит от структуры, наличия и вида функционально активных групп, их расположения в молекулах, длины и формы цепей, молекулярной массы. В то же

время, интегральным показателем качества поверхностно-активных веществ, учитывающим вышеприведенные особенности строения и свойства, является поверхностная активность, рассчитать величину, которой можно по изотерме поверхностного натяжения водного раствора. На рисунке 1 представлена функциональная связь поверхностного натяжения (σ) водных растворов пластификатора в зависимости от объемной доли (в процентах) его содержания (С) в растворе. Полученная зависимость представляет собой классический вариант изотермы адсорбции поверхностно-активного вещества, дифильные молекулы которого концентрируются в водной среде на границе раздела жидкой и газовой фаз в виде конденсированной пленки (при невысокой концентрации) или «частокола Ленгмюра» (при концентрациях ПАВ, близких к насыщению). Аппроксимация полученных данных различными математическими выражениями показала, что данная зависимость описывается уравнением полинома второй степени с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2=0,99$:

$$\sigma = 1,0 \cdot 10^{-6} C^2 - 0,3 \cdot 10^{-4} C + 0,071 \quad (1)$$

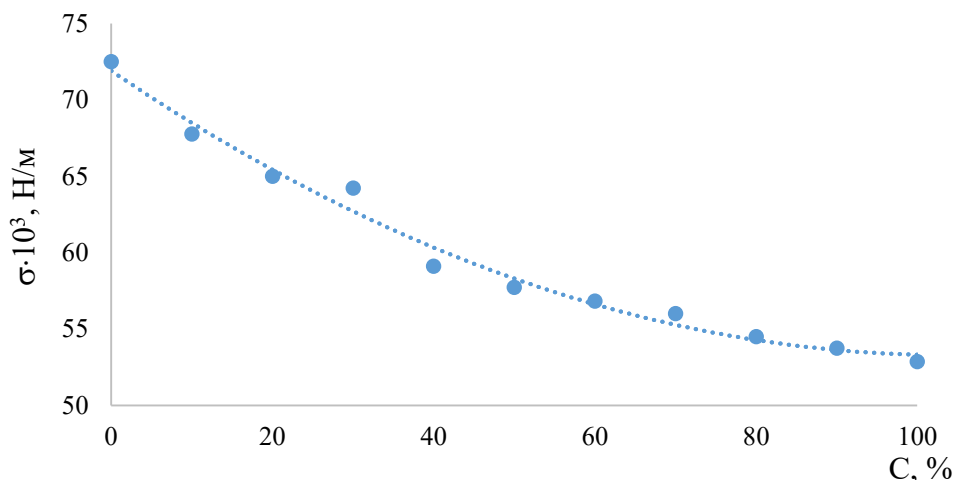


Рис. 1. Изотерма поверхностного натяжения водного раствора пластификатора

Дифференцирование выражения (1) по концентрации ПАВ в растворе позволило получить уравнения для расчета поверхностной активности водного раствора используемого пластификатора Пласбетон:

$$\frac{d\sigma}{dC} = 2,0 \cdot 10^{-6} C - 0,3 \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

Выражение (2) позволило рассчитать поверхностную активность пластификатора, значение которой находится в пределах $-3,0 \cdot 10^{-5}$ Дж/м².

Расчет величины адсорбции ПАВ (Γ) на межфазной границе осуществляли с использованием уравнения изотермы адсорбции Гиббса:

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \cdot \frac{d\sigma}{dC} \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль К); T – температура раствора, 293 К. Так, для диапазона по содержанию в водном растворе пластификатора величина Γ изменяется от $1,2 \cdot 10^{-9}$ моль/м² (при $C=10$ %) до $12,11 \cdot 10^{-9}$ моль/м² ($C=100$ %).

Для определения характеристики активности пластификатора, которая представляет собой предельное значение адсорбционной способности ПАВ (Γ_∞), было использовано уравнение изотермы Фрумкина:

$$\sigma = \sigma_0 + \Gamma_\infty RT \ln\left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_\infty}\right)$$

После преобразования можно получить следующее выражение для расчета предельной адсорбции по значениям поверхностного натяжения раствора σ_1 и σ_2 для каждой отдельной серии экспериментов. Это выражение имеет следующий вид:

$$\Gamma_\infty = \frac{B\Gamma_2 - \Gamma_1}{B - 1},$$

где $B = e^{\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2}}$; $\Delta\sigma = \sigma_i - \sigma_0$; σ_0 – поверхностное натяжение воды при температуре опыта, равное $72,80 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² (при 20 °С).

Тогда в случае серии экспериментов без добавки ССМ: при 10 % концентрации ПАВ $\sigma_1 = 67,77 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² и при 100 % концентрации $\sigma_2 = 52,87 \cdot 10^{-3}$ Дж/м²; Γ_1 и Γ_2 составили

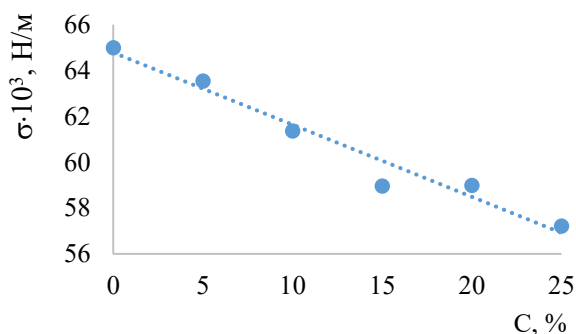


Рис. 2. Зависимость σ 20 %-го раствора пластификатора от количества добавки порошка ССМ

Функциональные зависимости (рис. 2 и 3) имеют линейный характер и описываются следующими математическими уравнениями:

для 20 % раствора пластификатора – $\sigma = -3,3 \cdot 10^{-2}C + 6,4 \cdot 10^{-2}$ ($R^2=0,94$);

для 80 % раствора пластификатора – $\sigma = -4,2 \cdot 10^{-2}C + 5,6 \cdot 10^{-2}$ ($R^2=0,86$).

Общий вид уравнения изотермы поверхностного натяжения имеет следующее выражение:

$$\sigma = -\frac{d\sigma}{dC}C + q, \quad (4)$$

где q – коэффициент поверхностной активности, исключаяющий влияние концентрации ПАВ на производную $\frac{d\sigma}{dC}$. Это предельное значение поверхностной активности при концентрации вещества $C \rightarrow 0$. Физический смысл коэффициента

$1,20 \cdot 10^{-9}$ моль/м² и $12,11 \cdot 10^{-9}$ моль/м², соответственно. В этом эксперименте коэффициент $B=1,28$. Тогда $\Gamma_\infty = 51,07 \cdot 10^{-9}$ моль/м².

Изотермы поверхностных натяжений для раствора пластификатора с добавкой 20 и 80 % высокодисперсного порошка ССМ приведены на рисунках 2 и 3. Следует отметить, что после механического помола в продолжении 30 мин удельная поверхность полученного сапонитсодержащего порошка составила 1530 м²/кг. Используемый режим механического диспергирования был выбран на основании предварительно проведенных экспериментов [14], в которых установлено, что удельная поверхность порошка при данном помоле возрастает практически в шесть раз по сравнению с исходной характеристикой и достигает максимума для 30 минутного периода, после чего стабилизируется, достигая значений 1500÷1550 м²/кг. Дальнейшее увеличение времени механического помола не приводит к возрастанию удельной поверхности получаемых порошков. ССМ в раствор пластификатора вводили в количестве от 5 до 25 объемных процента (С).

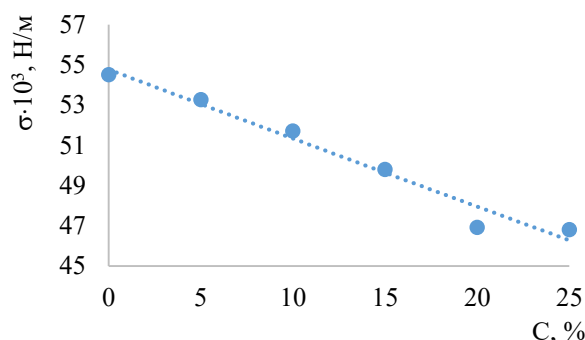


Рис. 3. Зависимость σ 80 %-го раствора пластификатора от количества добавки порошка ССМ

q – сила, удерживающая вещество на границе раздела фаз. Так, для раствора пластификатора эта величина равна $0,3 \cdot 10^{-4}$ Дж/м². В случае введения в 20 % раствор Пластбетона сапонитсодержащего порошка значение этого коэффициента возрастает до $6,4 \cdot 10^{-2}$ Дж/м². Но для концентрированных растворов пластификатора (например, 80 %) значение коэффициента $q = 5,6 \cdot 10^{-2}$ Дж/м².

Соответственно, для 20 % раствора пластификатора с добавкой ССМ $\frac{d\sigma}{dC} = -3,3 \cdot 10^{-2}$ и для 80 % раствора – $\frac{d\sigma}{dC} = -4,2 \cdot 10^{-2}$ [Дж/м²].

Расчет величины адсорбции ПАВ по уравнению (3) позволил получить следующие результаты: для 20 % раствора пластификатора $\Gamma = 1,3 \cdot 10^{-6} \div 13,5 \cdot 10^{-6}$ моль/м² и для 80 % раствора – $\Gamma = 1,7 \cdot 10^{-6} \div 17,2 \cdot 10^{-6}$ моль/м².

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что добавление в раствор пластификатора активного порошка сапонитсодержащего материала позволяет на порядок увеличить поверхностную активность пластифицирующей композиции, вследствие чего снижается поверхностное натяжение водной фазы за счет концентрирования молекул ПАВ на тонкодисперсных частицах твердой фазы. Образовавшийся конгломерат равномерно распределяется в объеме раствора, что приведет, при изготовлении бетонного композита, к уменьшению коэффициента трения (сопротивления) твердых частиц компонентов бетона при механическом перемешивании растворной смеси, выполняя роль «смазочного» агента. При этом повышается подвижность цементного теста при сокращении объемов потребляемой воды-затворения. Кроме того, необходимо отметить, что введение в состав растворной смеси тонкомолотого порошка ССМ будет способствовать не только оптимизации водоцементного отношения, но и синтезу гидросиликатов дополнительной генерации в процессе гидратации минералов цементного клинкера.

Выводы. Определены основные сорбционные характеристики водного раствора пластификатора: поверхностная активность, предельная адсорбция на границе раздела фаз. Установлено, что добавление в водный раствор пластификатора активного высокодисперсного сапонитсодержащего порошка с удельной поверхностью не менее $1500 \text{ м}^2/\text{кг}$ позволяет на порядок увеличить поверхностную активность пластифицирующей добавки. Сорбционная активность, оцениваемая по термодинамическому уравнению изотермы Гиббса, используемого ПАВ в водном растворе при введении минеральной сапонитсодержащей добавки увеличивается на три порядка.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-13-20013 «Грунтобетоны на основе органоминерального реактивного связующего для усиления исторических дорожных конструкций Соловецкого архипелага»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тараканов О.В., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Химические добавки в растворы и бетоны: монография. Москва; Вологда: Инфа-Инженерия, 2023. 168 с.
2. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Боцман Л.Н., Огурцова Ю.Н., Хахалева Е.Н. Композиционное вяжущее для монолитного строительства в Северных регионах // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. №11. С. 36–42.
3. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Черных Т.Н., Орлов А.А., Шуддяков К.В. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность. // Строительные материалы. 2016. №11. С. 21–25.
4. Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // Строительные материалы. 2006. №10. С. 5–7.
5. Тараканов О.В., Калашников В.И. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 223–229.
6. Тараканов О.В., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Химические добавки в растворы и бетоны: монография. Москва; Вологда: Инфа-Инженерия. 2023. 168 с.
7. Лесовик В.С., Толыпин Д.А. Сравнительная эффективность разжижителей в зависимости от электроповерхностных свойств мелких заполнителей // Университетская наука. 2023. №2(16). С. 42–44.
8. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. Из-во «Лань». 2015. 672 с.
9. Трунов П.В., Алфимова Н.И., Лесовик В.С., Шадский Е.Е., Потапов В.В. К вопросу об использовании вулканического сырья Камчатки в качестве минеральной добавки // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2014. №4. С. 84–89.
10. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М. Особенности определения удельной поверхности порошковых кварцсодержащих систем // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 1508–1515. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.
11. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. Оценка эффективности механоактивации кремнеземсодержащих горных пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №5. С. 19–27.
12. Морозова М.В. Сорбция водной фазы минеральной сапонит-содержащей добавкой в мелкозернистый бетон // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 4. С. 20–25.
13. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М., Дроздук Т.А., Фролова М.А., Гарамов Г.А. Интеркаляция сапонита из растворов электролитов, различающихся природой катиона. // Физика и химия обработки материалов. 2024. № 2. С. 36–46.
14. Морозова М.В. Влияние температурно-влажностной обработки на набор прочности мелкозернистого бетона с добавкой сапонитсодержащего материала // Нанотехнологии в строительстве. 2024. Т. 16, № 3. С. 227–234.

Информация об авторах

Фролова Мария Аркадьевна, кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения, реставрации и экологии в строительстве. E-mail: m.aizenstadt@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, д.17.

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительного материаловедения, изделий и конструкций». E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Дроздюк Татьяна Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения, реставрации и экологии в строительстве. E-mail: t.drozdyuk@narfu.ru. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, д.17.

Поступила 09.12.2024 г.

© Фролова М.А., Лесовик В.С., Дроздюк Т.А., 2025

¹Frolova M.A., ²Lesovik V.S., ^{1,*}Drozdyuk T.A.

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

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

*E-mail: t.drozdyuk@narfu.ru

INFLUENCE OF MINERAL FINE SAPONITE-CONTAINING ADDITIVE ON SURFACE ACTIVITY OF PLASTICIZER

Abstract. Plasticizing additives, which are surface-active substances, are widely used in the production of concrete mixtures in order to reduce the water-cement ratio and at the same time maintain the required mobility of the concrete mixture. There are various classes of such additives, the mechanism of action of which may differ, but is due to the occurrence of a common stage associated with the adsorption of plasticizer molecules on the surface of clinker minerals. During this stage, part of the water is released, which provides the plasticizing effect. The mechanism of action of a plasticizer based on an aqueous solution of surfactants is determined by its surface activity. Adding an additional component to the surfactant can change the value of the surface activity of the solution. In this regard, saponite-containing material (a waste product of the diamond mining industry), capable of exhibiting high adsorption-desorption activity in a finely dispersed state, is of particular interest. To study the effect of saponite-containing material on the properties of the plasticizing additive, highly dispersed saponite-containing powder was added to aqueous solutions of the plasticizer and the surface activity of the resulting solutions was determined. It was found that adding active highly dispersed saponite-containing powder with a specific surface of at least 1500 m²/kg to an aqueous solution of the plasticizer allows for an order of magnitude increase in the surface activity of the plasticizing additive.

Keywords: saponite-containing material, plasticizer, surface activity, highly dispersed powder, water-cement ratio.

REFERENCES

1. Tarakanov O.V., Erofeev B.T., Smirnov V.F. Chemical additives in mortars and concretes: monograph [Khimicheskiye dobavki v rastvory i betony: monografiya.] Moscow, Vologda: Infa-Engineering, 2023. 168 p. (rus).
2. Strokova V.V., Nelubova V.V., Botsman L.N., Ogurtsova Yu.N., Khakhalaeva E.N. Composite binder for monolithic construction in the Northern regions [Kompozitsionnoye vyazhushcheye dlya monolitnogo stroitel'stva v Severnykh regionakh]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 36–42. (rus)
3. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Chernykh T.N., Orlov A.A., Shuldyakov K.V. Modern superplasticizers for concrete, features of their application and efficiency [Sovremennyye superplastifikatory

dlya betonov, osobennosti ikh primeneniya i effektivnost']. Construction materials. 2016. No. 11. Pp. 21–25. (rus)

4. Batrakov V.G. Concrete modifiers: new possibilities and prospects [Modifikatory betona: novyye vozmozhnosti i perspektivy]. Construction materials. 2006. No. 10. Pp. 5–7. (rus)

5. Tarakanov O.V., Kalashnikov V.I. Prospects for the use of complex additives in new generation concretes [Perspektivy primeneniya kompleksnykh dobavok v betonakh novogo pokoleniya]. News of KSUACE. 2017. No. 1(39). Pp. 223–229. (rus)

6. Tarakanov O.V., Erofeev V.T., Smirnov V.F. Chemical additives in solutions and concretes: monograph [Chemical additives in solutions and concretes: monograph]. Moscow, Vologda: Infa-Engineering, 2023. 168 p. (rus)

7. Lesovik V.S., Tolypin D.A. Comparative efficiency of thinners depending on the electrosurface properties of fine aggregates [Sravnitel'naya effektivnost' razzhizhiteley v zavisimosti ot elektropoverkhnostnykh svoystv melkikh zapolniteley]. University Science. 2023. No. 2(16). Pp. 42–44. (rus)
8. Volkov V.A. Colloid Chemistry. Surface Phenomena and Disperse Systems. Textbook for Universities [Kolloidnaya khimiya. Poverkhnostnyye yavleniya i dispersnyye sistemy. Uchebnik dlya vuzov]. Publishing house "Lan", 2015. 672 p. (rus)
9. Trunov P.V., Alfimova N.I., Lesovik V.S., Shadskiy E.E., Potapov V.V. On the issue of using volcanic raw materials of Kamchatka as a mineral additive [K voprosu ob ispol'zovanii vulkanicheskogo syr'ya Kamchatki v kachestve mineral'noy dobavki]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2014. No. 4. Pp. 84–89. (rus)
10. Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M. Features of determining the specific surface area of powder quartz-containing systems [Osobennosti opredeleniya udel'noy poverkhno-sti poroshkovykh kvartssoderzhashchikh sistem] Bulletin of MGSU. 2022. Vol. 17(1). Pp. 1508–1515. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.
11. Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M., Kononova V.M., Danilov V.E. Evaluation of the efficiency of mechanical activation of silica-containing rocks [Otsenka effektivnosti mekhanoaktivatsii kremnezemsoderzhashchikh gornykh porod]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2021. No.5. Pp. 19–27. (rus)
12. Morozova M. V. Sorption of aqueous phase by mineral saponite-containing additive in fine-grained concrete [Sorbtsiya vodnoy fazy mineral'noy saponit-soderzhashchey dobavkoy v melkozernisty beton]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 4. Pp. 20–25. (rus)
13. Danilov V.E., Ayzenshtadt A.M., Drozdyuk T.A., Frolova M.A., Garamov G.A. Intercalation of saponite from electrolyte solutions differing in the nature of the cation [Interkalyatsiya saponita iz rastvorov elektrolitov, razlichayushchikhsya prirodoy kationa]. Physics and Chemistry of Materials Processing. 2024. No. 2. Pp. 36–46. (rus)
14. Morozova M.V. The effect of temperature and humidity treatment on the strength set of fine-grained concrete with the addition of saponite-containing material. Nanotechnology in Construction. 2024. No. 3. Vol. 16. Pp. 227–234.

Information about the authors

Frolova, Mariia A. PhD, Assistant professor. E-mail: m.aizenstadt@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, emb. Northern Dvina, 17.

Lesovik, Valery S. DSc., Professor. E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Drozdyuk, Tatiana A. PhD. E-mail: t.drozdyuk@narfu.ru. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Russia, 163002, Arkhangelsk, emb. Northern Dvina, 17.

Received 09.12.2024

Для цитирования:

Фролова М.А., Лесовик В.С., Дроздюк Т.А. Влияние на поверхностную активность пластификатора минеральной тонкодисперсной сапонитсодержащей добавки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 35–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-35-41

For citation:

Frolova M.A., Lesovik V.S., Drozdyuk T.A. Influence of mineral fine saponite-containing additive on surface activity of plasticizer. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 35–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-35-41

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-42-55

Тимофеев П.С.

Сибирский государственный университет путей сообщения

*E-mail: rao.ker@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЕБЕТОННЫХ УЗЛОВ, НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАРУБЕЖНЫХ УЧЕНЫХ

Аннотация. В статье рассматривается численное исследование балочного срезного узла (БСУ) в сталебетонных конструкциях с использованием программного комплекса ANSYS. Актуальность применения сталебетонных конструкций в строительстве многоэтажных зданий и инфраструктурных объектов обусловлена их высокой прочностью, экономичностью и долговечностью. Однако использование монолитных перекрытий со сталебетонными колоннами ограничено сложностью строительства и архитектурными ограничениями. Целью исследования является проверка достоверности результатов, полученных в предыдущих экспериментах, и оценка точности применения метода конечных элементов для расчета срезных узлов. В качестве основы для численного моделирования использован опыт Д.В. Бомпа и А.Й. Эльгазули, проведенный для анализа соединения стальной колонны и железобетонной плиты. Результаты численного моделирования показали высокую степень сходимости с экспериментальными данными (до 98 %) и подтверждают возможность использования метода конечных элементов для точного прогнозирования поведения БСУ при различных нагрузках. Также были выявлены ограничения модели, которые требуют дальнейшего уточнения и детализированного учета свойств материалов для повышения точности расчетов. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации проектирования сталебетонных конструкций и повышения их надежности в строительной практике.

Ключевые слова: сталебетонные конструкции, балочный срезной узел, численное моделирование; метод конечных элементов (МКЭ), ANSYS, нелинейный анализ, прочность конструкций, сравнение с экспериментом, геометрическая нелинейность, срезные нагрузки.

Введение. Актуальность использования сталебетонных конструкций в строительстве сегодня наблюдается во многих областях. Они активно применяются в строительстве многоэтажных зданий, мостов, промышленных сооружений, торговых центров и других инфраструктурных объектов. Это связано с рядом преимуществ, которые предлагают сталебетонные конструкции. Такие конструкции обладают высокой прочностью и жесткостью, что позволяет им переносить значительные нагрузки и обеспечивать долговечность. Кроме того, они обладают лучшими отношениями между прочностью и массой, что позволяет создавать более легкие и экономичные конструкции [1, 2]. Сталебетонные конструкции также характеризуются доступностью и широким спектром применения. Однако, в строительной практике монолитные перекрытия со сталебетонными колоннами используются менее активно. Это связано с некоторыми факторами, такими как сложность строительства и ограничения в архитектурном дизайне. Строительство монолитных перекрытий требует более сложного и трудоемкого процесса, а также координации работ между колоннами и перекрытиями [2–4]. Кроме того, архитектурные ограничения могут ограничивать свободу дизайнера и размещения колонн внутри помещений. Дополнительно, использование сталебетонных конструкций может

быть более затратным по сравнению с альтернативными методами строительства. В свете этих факторов, численные исследования балочного срезного узла в сталебетонных конструкциях с использованием программного комплекса ANSYS приобретают особую актуальность [5–7].

В зарубежной практике для соединения сталебетонных колонн и монолитного железобетонного перекрытия применяется так называемый балочный срезной узел. БСУ представляет собой конструктивный элемент, который обеспечивает передачу поперечных сил и моментов между стальными и бетонными элементами конструкции [3–6]. Она располагается в верхней части колонны и служит для эффективного переноса срезных нагрузок от перекрытия на колонну. БСУ обычно состоит из стальных арматурных элементов, железобетонных или композитных плит и соединительных элементов. Он должен быть спроектирован с учетом требований к прочности, устойчивости и долговечности конструкции.

БСУ является критической зоной, где происходит перенос нагрузок между вертикальными несущими элементами и перекрытиями [5, 6]. Численные исследования с помощью Ansys позволяют более точно анализировать поведение и прочность таких узлов, оптимизировать их конструкцию и повысить безопасность. Предсказывая поведение данных узлов при различных

нагрузках и условиях, можно выявлять потенциальные проблемные зоны и принимать обоснованные решения для разработки оптимальных конструктивных решений. Это способствует повышению безопасности и надежности сталебетонных конструкций и способствует их более широкому использованию в строительной практике [7, 8].

В данном исследовании приведены результаты численного исследования узла «срезной головки» с использованием программного комплекса ANSYS, на основе опыта, проведенного Д.В. Бомпа и А.Й. Эльгазули [9].

Цели исследования определены, как:

1. Проверка достоверности результатов, полученных Д.В. Бомпа и А.Й. Эльгазули, путем повторения эксперимента и проведения расчетов в Ansys.

2. Оценка точности и применимости метода конечных элементов для расчета сложно-деформированного состояния узла соединения сталебетонной колонны и монолитного железобетонного перекрытия.

3. Оптимизация конструкции или расчетных параметров для достижения более точных совпадающих результатов.

4. Предложение рекомендаций для дальнейших исследований: на основе вашего сравнительного анализа и результатов, вы можете сделать рекомендации для дальнейших исследований в этой области. Это может включать предложения по улучшению модели, расширению области исследования или углублению в специфические аспекты поведения конструкции.

Использование метода конечных элементов в расчете модели балочного срезного узла в сталебетонных конструкциях с применением программного комплекса ANSYS имеет несколько ключевых преимуществ.

Первое преимущество заключается в способности метода точно учитывать сложную геометрию и конструктивные особенности БСУ. В отличие от простых аналитических моделей, метод конечных элементов позволяет моделировать все детали, такие как закругления, фаски и другие геометрические особенности, что обеспечивает более точные и достоверные результаты [10, 11].

Второе преимущество связано с необходимостью детального анализа и оптимизации сталебетонных конструкций, которые широко используются в современном строительстве благодаря своей высокой прочности и устойчивости. Метод конечных элементов позволяет глубже понять поведение конструктивных элементов, таких как БСУ, под нагрузкой, определить критические точки и предотвратить потенциальные повреждения [11–14].

Третье преимущество заключается в способности метода конечных элементов учитывать нелинейные свойства материалов, таких как пластичность, деформация и разрушение стали и бетона. Эти свойства могут существенно влиять на общую производительность конструкции. Учет нелинейностей позволяет получить более точное и реалистичное представление о поведении БСУ в условиях реальной эксплуатации [6, 9].

Таким образом, использование метода конечных элементов для расчета БСУ в ANSYS оправдано необходимостью учета сложной геометрии и конструктивных особенностей, нелинейных свойств материалов, а также обеспечения точного анализа и прогнозирования поведения конструкции. Это способствует повышению безопасности и надежности сталебетонных конструкций [14].

Описание опыта, приводимого в качестве основы для конечно-элементной модели. В исследовании использовались шесть гибридных элементов, представляющих соединение стальной колонны с железобетонной плитой. Образцы были спроектированы таким образом, чтобы в большинстве случаев разрушение происходило из-за продавливающего сдвига. Размеры образцов были определены с учетом практических соображений и ограничений эксперимента [9].

Номинальная толщина плоской плиты составляла 225 мм, а размеры в плоскости были 2,2 м × 2,2 м. Испытанные элементы воспроизводили область соединения между стальной колонной и сильно нагруженной сплошной плоской плитой с пролетом около 4,5 м. Изолированные элементы были изготовлены из стальной трубы закрытого сечения, к которой были приварены четыре БСУ, полностью встроенные в плоскую железобетонную плиту (табл. 1).

Таблица 1

Детали образца и свойства материала

Образец	Тип элемента продавливания	Толщина плиты, мм	Длина анкеровки, мм	Процент армирования (I %)
HS13-00	HEB100	225	370	1,37
HS13-C0	HEB100	225	370	1,33
HS13-0T	HEB100	225	370	1,35
HS13-CT	HEB100	255	370	1,36

С – пластина вокруг колонны, Т – наличие поперечной арматуры

В исследовании рассматривались различные параметры, включая коэффициент армирования на изгиб, наличие поперечной арматуры и наличие пластины сплошности вокруг колонны. Толщина плиты, конфигурация в плоскости и встроенная длина элементов БСУ оставались постоянными.

Применялись различные типы арматурной сетки и поперечной арматуры. Для оценки прочности материалов использовались испытания стальных образцов. Основная цель исследования заключалась в изучении производительности гибридных элементов в соединении стальной колонны с железобетонной плитой.

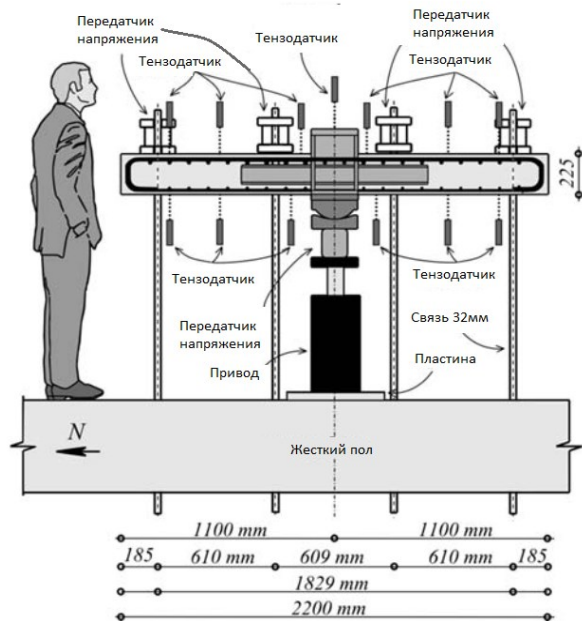


Рис. 1. Схематическое изображение испытательной установки [9]

$$r_q = 964 \text{ mm}$$

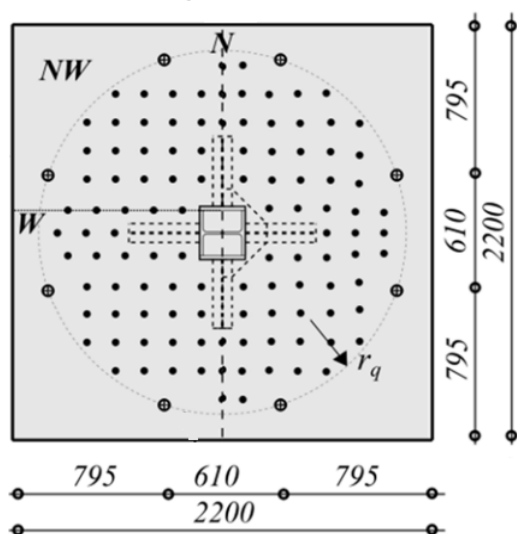


Рис. 2. Схематическое изображение испытательной установки [9]

На рис. 1 и рис. 2 представлен общий вид расположения испытательного оборудования.

Испытательная установка была разработана для реалистичной экспериментальной оценки гибридных соединений стальной колонны и железобетонной плиты. Нагрузка вводилась непосредственно на колонну через исполнительный механизм с максимальной нагрузкой 3500 кН. Восемь опорных пластин толщиной 40 мм и диаметром 180 мм были закреплены к жесткому диску, представленным полом через реакционные болты диаметром 32 мм, с продольной осью на расстоянии 964 мм от центра колонны. Реакционные силы на опорах были зарегистрированы с помощью тензодатчиков. Все испытания проводились в режиме постепенного нагружения. Нагрузка прибавлялась порциями по 20 кН и поддерживалась постоянной в течение 30 секунд после завершения каждого этапа нагрузки. Визуальное отслеживание начала и распространения трещин осуществлялось с помощью системы цифровой корреляции изображений для записи начала возникновения стохастических трещин в нормальном и наклонном сечениях на верхней поверхности плиты.

2.1. Разработка модели эксперимента в ANSYS:

При повторении опыта решались четыре задачи, с построением четырех различных схем, согласно опыту Д.В. Бомпа и А.И. Эльгазули [8]. Модель рассчитывалась по методу Ньюджента-Хопкинса [15].

Каждая их схема повторяла размеры образцов, испытанных в опыте. Моделирование проводилось с использованием сторонних средств твердотельного моделирования, с последующим экспортом в программный комплекс Ansys и доработкой в Space Clame. В каждой модели перекрытие поэлементно делилось на 9 зон, согласно типу испытываемых деформаций: центральная зона ограничивалась длиной вылета балочных элементов, представленных двутавровыми балками см. рис. 3.

Расчет проводился с использованием модуля статического расчета в нелинейной постановке с учетом физической и геометрической нелинейности. Геометрическая нелинейность обеспечивалась внутренними функциями ANSYS, путем пошагового приложения нагрузки. Физическая нелинейность достигалась за счет использования модели деформирования бетона Друкера-Праггера [10, 16]. Для нелинейного расчета были заданы следующие характеристики: минимальное количество шагов - 25, максимальное количество шагов - 350. Это количество шагов обеспечивало оптимальную сходимость при расчете конструкций в период предразрушения. Арматурные стержни были заданы как линейные элементы, работающие в одном направлении.

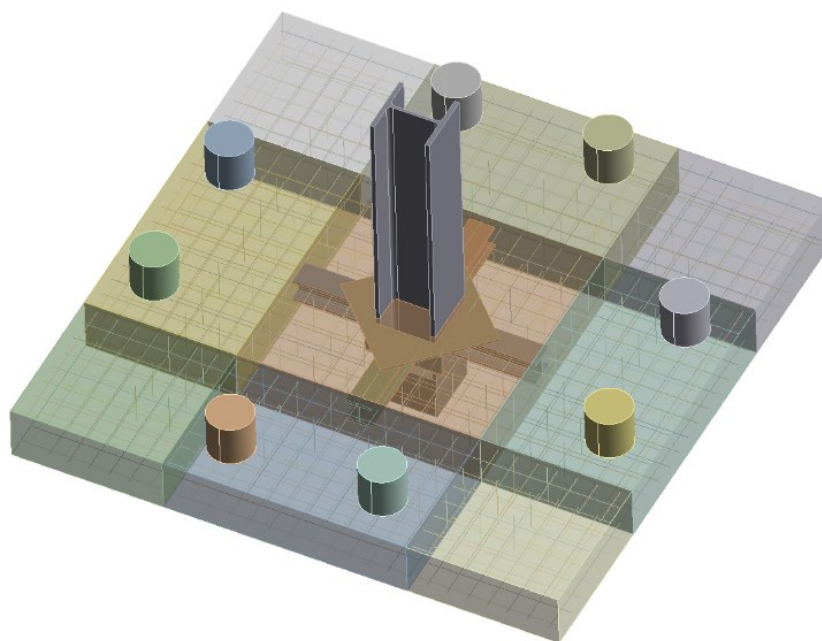


Рис. 3. Общая расчетная схема узла в ANSYS

В соответствии с поставленной задачей, пластины, связывающие балочные элементы узла, либо отсутствовали, либо геометрически соответствовали размерам пластин, использованных в эксперименте. Моделирование пластин осуществлялось в виде квадратов со стороной 400 мм [9].

Сетка конечных элементов была сформирована комплексно с учётом всех возможных соединений в исследуемом узле. Для элементов крепления двутавровых балок первоначально выполнялась разбивка по рёбрам с размером ячейки сетки 20 мм, после чего посредством инструмента «метод развёртки» создавалась сетка конечных элементов для пластин. Для анкерных элементов сетка также назначалась с размером ячейки 20 мм с учётом разбивки поверхности крепёжных пластин. Соединения между твердотельными элементами в бетонной плите удалялись вручную, поскольку при построении сетки конечных элементов для плиты применялись методы генерации сетки для всех девяти блоков, на которые она была разделена.

Граничные условия задавались типом «Remote Displacement» для цилиндрических элементов, моделирующих пластины закрепления.

Соединение конечных элементов цилиндрических связей и железобетонной плиты перекрытия определялось как «грубое» с симметричным поведением связи, описанным расширенной теорией Лагранжа в формулировке закона соединения [17]. Для данного типа связи были разрешены малые скольжения, что соответствовало поведению пластин в физическом эксперименте.

В качестве элемента приложения нагрузки в модели использовался куб размерами $240 \times 240 \times 300$ мм, на нижнюю грань которого прикладывалась максимально возможная нагрузка (табл.2). На первом этапе моделирования применялась нагрузка, приводящая к разрушению экспериментальной модели; в последующих итерациях нагрузка корректировалась в зависимости от сходимости модели. Максимальные значения нагрузок для каждой модели представлены в таблице 2. Подбор максимальных нагрузок осуществлялся с использованием многоитерационного метода расчёта, и окончательная нагрузка принималась на стадии, когда пластические деформации в бетоне существенно возрастали по нелинейному закону [10, 16].

Таблица 2

Нагрузки, приводившие к разрушению модели

Образец	Нагрузка по результатам эксперимента (кН)	Нагрузка полученная в Ansys (кН)	Процент сходимости (1 %)
HS13-00	991	1060	93,5
HS13-C0	1005	1100	91,4
HS13-0T	1655	1490	90
HS13-CT	1830	1800	98,4

2.2. Математические модели и уравнения. Учет физической нелинейности в модели достигался за счет применения нелинейных моделей

деформирования бетона и стали. Для стали использовалась стандартная диаграмма деформирования на основе билинейной модели (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики стали для билинейной модели деформирования

Модуль Юнга (МПа)	Коэффициент Пуассона	Модуль жесткости (МПа)	Модуль сдвига (МПа)
$2 \cdot 10^5$	0,3	$1,67 \cdot 10^5$	76923

Для бетона применялась модель деформирования Друкера-Прагера, которая представляет собой модель пластичности, основанную на дифференциальном потенциале, которая описывает поведение материала при трехосном напряженном состоянии [10, 16]. Она рассматривает пластическую деформацию и разрушение материала, исходя из функции потенциала, зависящей только от инвариантов тензора напряжений.

Возможность использования модели Друкера-Прагера.

1. Пластичность материала. Модель подходит для материалов с пластическими свойствами, таких как бетон в стальбетонных конструкциях, который может деформироваться и разрушаться при достижении предельных напряжений. Модель Друкера-Прагера учитывает это поведение в условиях трехосного напряженного состояния [10, 17].

2. Неупругое поведение. Модель учитывает пластическую деформацию и разрушение

материала, что важно для анализа узлов стальбетонных конструкций, особенно в местах соединений, таких как балочный срезной узел [18-20].

3. Трехосное напряженное состояние. Модель разработана для учета напряжений в трех направлениях, что позволяет адекватно моделировать сложные напряженные состояния в сталебетонных конструкциях [11].

4. Угол внутреннего трения. Ключевой параметр модели, определяющий поведение материала при различных напряжениях. Его значение определяется экспериментально или согласно стандартам [15, 21, 22].

Модель Друкера-Прагера в ANSYS позволяет точно моделировать сложные напряжения и деформации в балочном срезном узле, учитывая пластичность бетона и его разрушение. Для расчета используется элемент SOLID65, поддерживающий нелинейное поведение и анизотропию материала [18-20]. Характеристики бетона задавались согласно нормативам для экспериментальных образцов (табл. 4).

Таблица 4

Характеристики бетона для модели деформирования Drucker-Prager

Модуль Юнга (МПа)	Коэффициент Пуассона	Модуль жесткости (МПа)	Модуль сдвига (МПа)	Предел прочности в одноосном сжатии (МПа)	Предел прочности в одноосном растяжении (МПа)	Предел прочности в двухосном сжатии (МПа)
$36 \cdot 10^3$	0,2	$20 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^3$	42	2,5	42

В качестве допущений, которые могли незначительно повлиять на результат, в модели приняты: диаграмма деформирования стали. Так как основные пластические деформации во всех четырех задачах возникали в бетоне, то для уменьшения сложности много-итерационного расчета, не был использован мультилинейный график деформирования стали. Элементы, имитирующие пластины в эксперименте заданы цилиндрами с высотой 200мм для предотвращения их деформаций и упрощения сходимости модели [22].

3. Проверка модели и сравнение с опытом:

Результаты расчета модели в программном комплексе ANSYS сравнивались каждой экспериментальной модели в соответствии с исходными условиями, нагрузками и деформациями.

Сравнительный анализ проводился по зависимости деформаций перекрытия: в эксперименте измерялось вертикальное перемещение элемента, имитирующего колонну. Сравнение графиков деформаций приведены на рис. 4, 8, 12, 16.

Так же сравнение результатов проводилось по результатам картины трещинообразования, зафиксированной в эксперименте и картины пластических деформаций от максимальной нагрузки в ANSYS. Схемы представлены на рис. 5-7, 9-11, 13-15, 17-19.

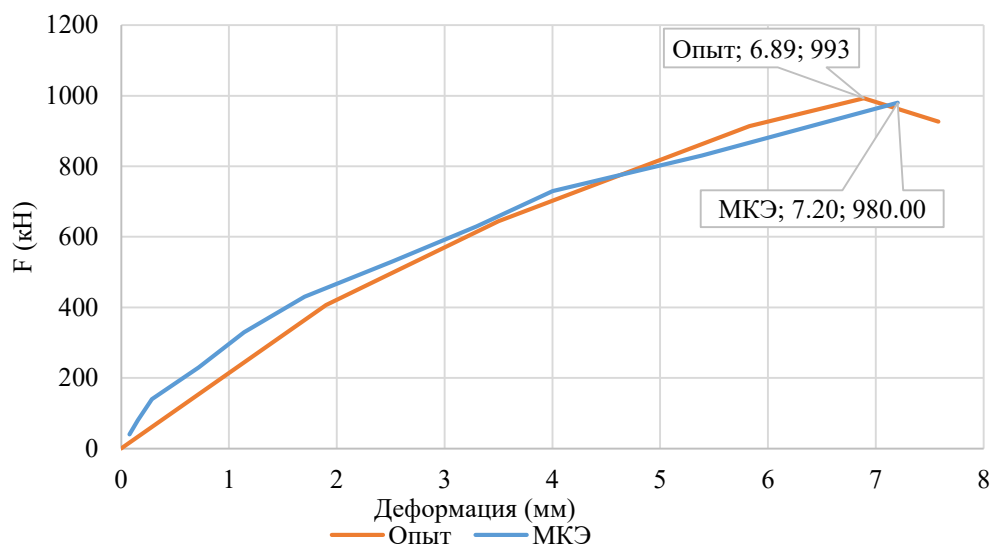


Рис. 4. График сравнения результатов натурного и численного эксперимента в ANSYS. Опыт с пластиной без поперечной арматуры (HS13-C0).

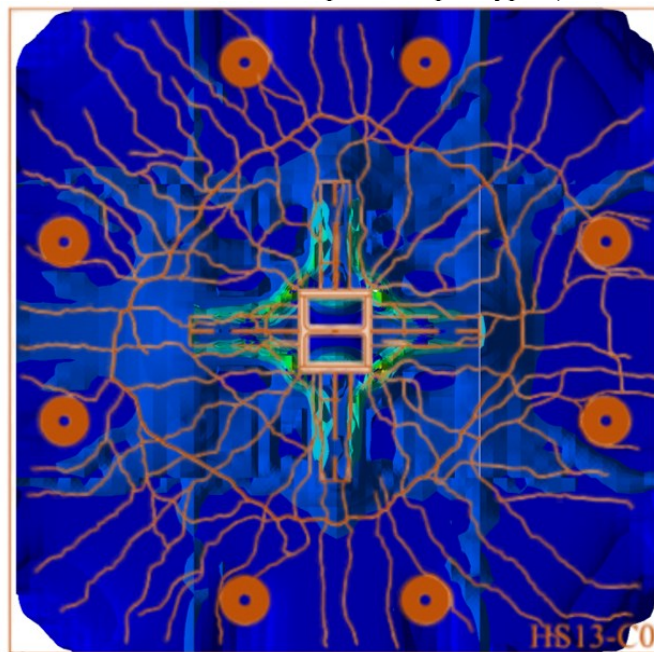


Рис. 5. Сравнение картины трещинообразования в эксперименте и пластических деформаций в расчетной модели ANSYS. Опыт с пластиной без поперечной арматуры (HS13-C0).



Рис. 6. Разрушение экспериментальной модели. Опыт с пластиной без поперечной арматуры (HS13-C0) [9]



Рис. 7. Максимальные пластические деформации в модели ANSYS. Опыт с пластиной без поперечной арматуры (HS13-C0)

В модели HS13-C0 наблюдается характерная "чаша" разрушения, которая точно воспроизводит пластические деформации в ANSYS при максимальной нагрузке. Эта "чаша" охватывает верхнюю плоскость плиты, начиная от внешней границы зоны продавливания и не доходя до нижней границы плиты. В эксперименте нижний конец образовавшейся трещины находится практически под геометрическим центром образца, в то время как в идеализированной модели ANSYS

трещина находится в его геометрическом центре (рис. 5-7).

Различия можно наблюдать на графиках зависимости деформации от нагрузки, где максимальные значения деформации в ANSYS при более низкой нагрузке практически совпадают с экспериментальными значениями смещения. Однако, значение нагрузки, приводящей к разрушению, между графиками несущественно отличается от экспериментальных данных (рис. 4).

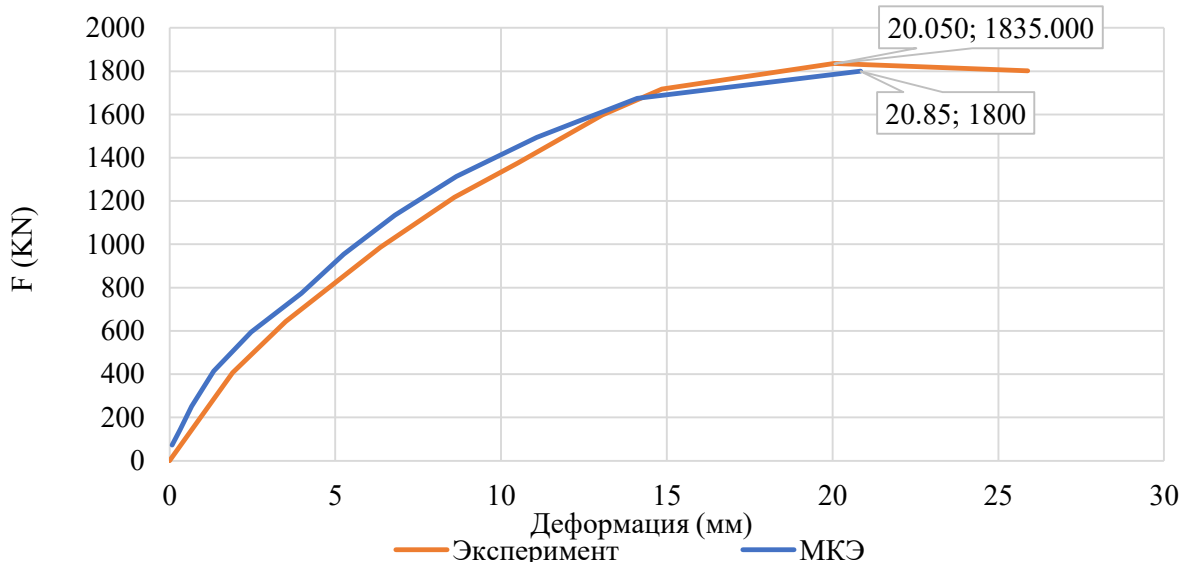


Рис. 8. График сравнения результатов натурного и численного эксперимента в ANSYS. Опыт с пластиной с поперечной арматурой (HS13-CT)

В модели HS13-CT наблюдаются не характерные деформации разрушения, совпадающие с пластическими деформации в ANSYS при максимальной нагрузке. Согласно картине разрушения, ввод пластины меняет принцип разрушения по чаше на разрушение по цилиндрическим областям вокруг балочных элементов БСУ (рис. 9-11).

Различия в графиках зависимости деформации от нагрузки несущественны, значения совпадают, как по разрушающим усилиям, так и по восходящей ветви графика зависимости деформаций от приложенной нагрузки (рис.8).

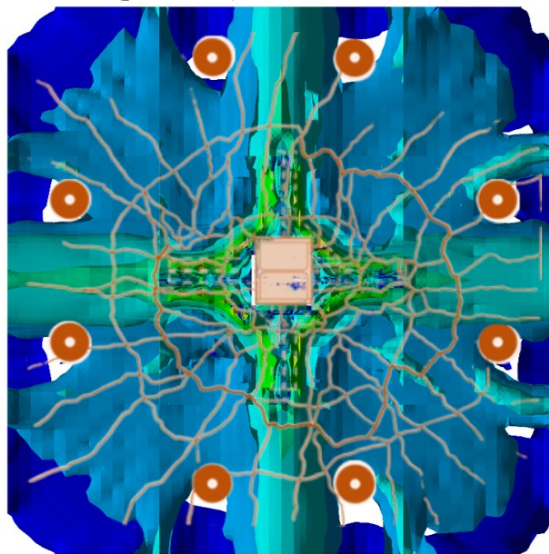


Рис. 9. Сравнение картины трещинообразования в эксперименте и пластических деформаций в расчетной модели ANSYS. Опыт с пластиной с поперечной арматурой (HS13-CT)



Рис. 10. Разрушение экспериментальной модели. Опыт с пластиной с поперечной арматурой (HS13-CT) [9]



Рис. 11. Максимальные пластические деформации в модели ANSYS. Опыт с пластиной с поперечной арматурой (HS13-CT)

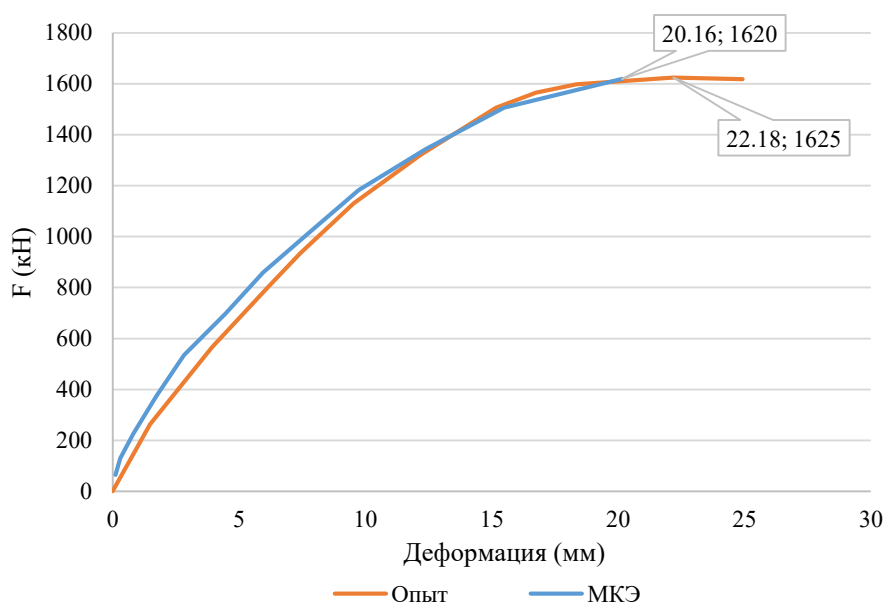


Рис. 12. График сравнения результатов натурального и численного эксперимента в ANSYS. Опыт без пластины с поперечной арматурой (HS13-OT).

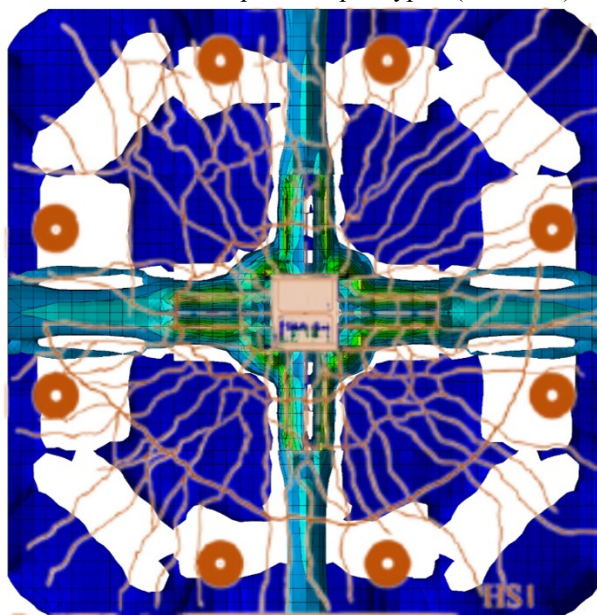


Рис. 13. Сравнение картины трещинообразования в эксперименте и пластических деформаций в расчетной модели ANSYS. Опыт без пластины с поперечной арматурой (HS13-OT)



Рис. 14. Разрушение экспериментальной модели. Опыт без пластины с поперечной арматурой (HS13-0T) [9]

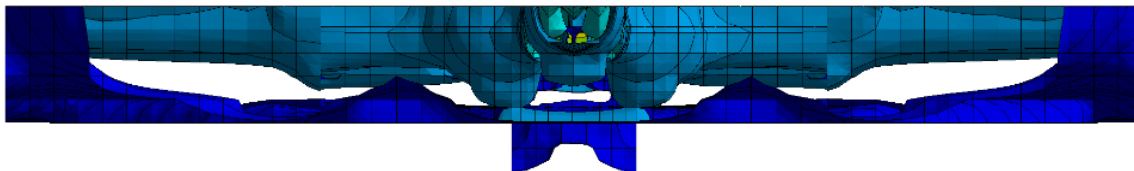


Рис. 15. Максимальные пластические деформации в модели ANSYS.

Опыт без пластины с поперечной арматурой (HS13-0T)

В модели HS13-0T наблюдается не столь характерная "чаша" разрушения, совпадающая с пластическими деформации в ANSYS при максимальной нагрузке. На испытанном образце рис.14 и на картине пластических деформации рис.15, видны не характерные цилиндрические контуры, возникшие вокруг балочных элементов БСУ, одновременно с этим дополняющие картину классического трещинообразования в форме чаши (рис.13-15).

На графики зависимости деформации от нагрузки для экспериментальных и численных испытаний имеют близкие значения. Площадка разрушения, обозначающая момент срастания трещин и наступление третьей стадии напряженно-деформированного состояния совпадают (рис. 12).

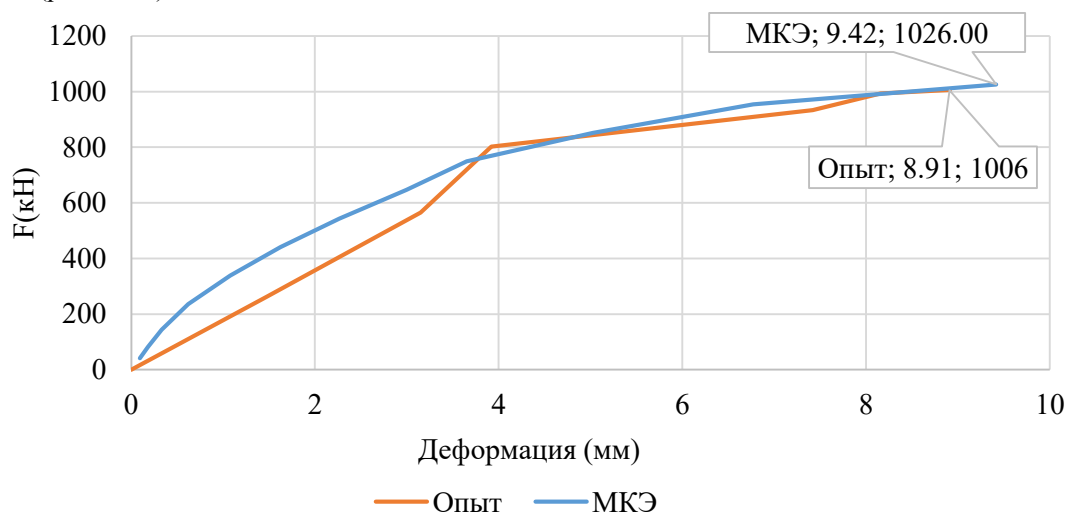


Рис. 16. График сравнения результатов натурного и численного эксперимента в ANSYS.

Опыт без пластины и без поперечной арматуры (HS13-00)

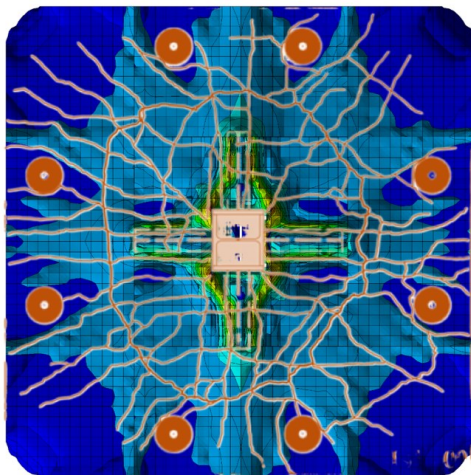


Рис. 17. Сравнение картины трещинообразования в эксперименте и пластических деформаций в расчетной модели ANSYS. Опыт без пластины и без поперечной арматуры (HS13-00)



Рис. 18. Разрушение экспериментальной модели. Опыт без пластины и без поперечной арматуры (HS13-00) [9]

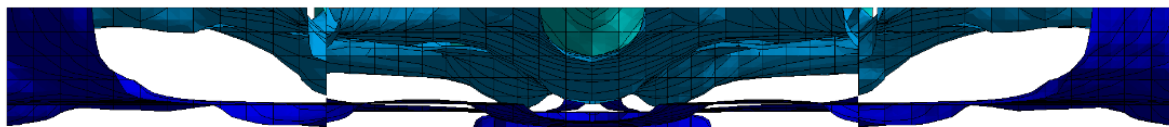


Рис. 19. Максимальные пластические деформации в модели ANSYS. Опыт без пластины и без поперечной арматуры (HS13-00)

В модели HS13-00, как в идеализированной модели пластических деформаций, так и в проведенном эксперименте, наблюдаются классическая картина трещинообразования в форме чаши. ANSYS точно воспроизводит картину пластических деформаций, соответствующую разрушению экспериментальной модели при максимальной нагрузке. Пластические деформации в бетоне не распространяются к нижней грани плиты, что согласуется с поведением модели HS13-00 (рис. 17–19).

На графиках также наблюдаются значительные различия между экспериментальной и идеализированной моделями в значениях. В идеализированной модели деформации в стадии упругой работы бетона и в моменты образования трещин оказываются меньше, чем в экспериментальном образце, и этот тренд сохраняется до

начала стадии II напряженно-деформирован. Разрушение в обеих моделях наступает при схожих значениях нагрузки, но при отличающихся деформациях (рис. 16).

Результаты. Проведенное численное моделирование с использованием метода конечных элементов в ANSYS было сравнено с экспериментальными данными, полученными в аналогичном исследовании. Уровень соответствия численных и экспериментальных результатов превысил 90 %, что свидетельствует о высокой точности модели.

Согласно полученным данным, был составлен график сходимости для всех 4 исследуемых образцов, который показал высокую сходимость результатов. С Коэффициентом корреляции Пирсона более 0,95, из которого следует, что ряды данных имеют высокую степень сходимости (рис. 20).

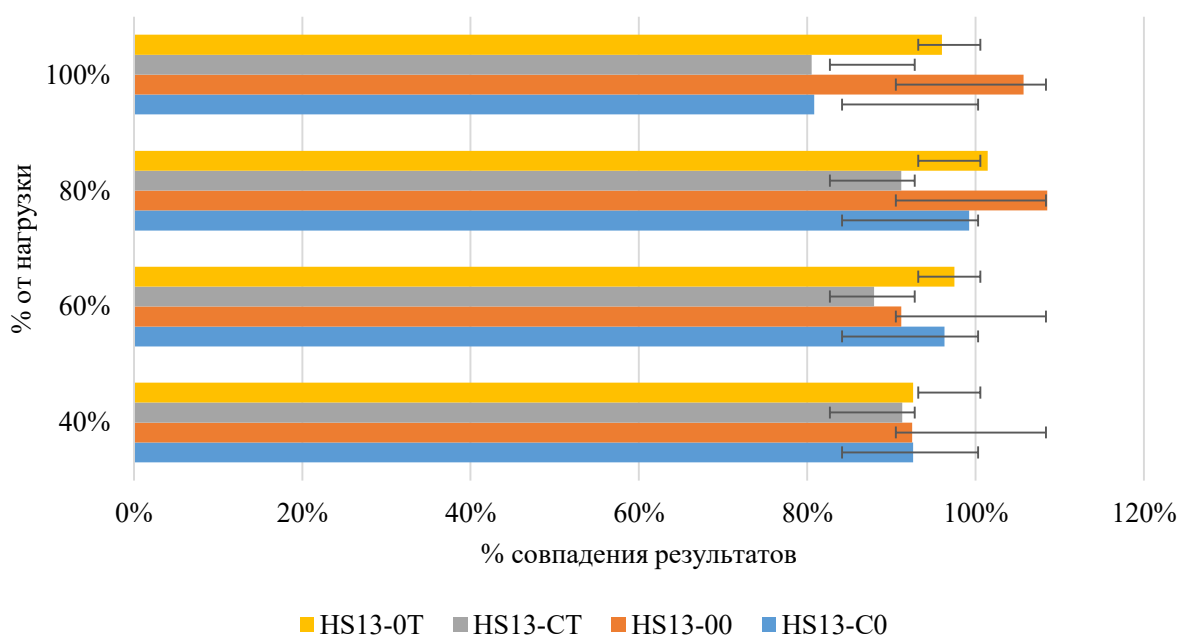


Рис. 20. График сходимости результатов

Основные выводы по моделям:

- **Модель HS13-C0.** Обнаружено точное воспроизведение пластических деформаций в виде характерной "чаши" разрушения при максимальной нагрузке. Зависимость деформации от напряжения на всех стадиях деформирования показывают высокую сходимость, но разрушение испытуемого образца наступило раньше, чем рост необратимых, а именно пластических, деформаций.

- **Модель HS13-CT.** Модель ANSYS точно отразила цилиндрические контуры пластических деформаций вокруг анкерных элементов балок, как и в эксперименте. Однако, различия наблюдаются в характере и интенсивности деформаций в конечной стадии нагружения.

- **Модель HS13-0T.** Подтверждено воспроизведение "чаши" разрушения при максимальной нагрузке, расхождения аналитической модели с испытываемым образцом минимальны.

- **Модель HS13-00.** ANSYS точно отразил пластические деформации в областях с анкерными элементами, минимальные различия в значениях деформаций и их характере проявляются на стадии пластичной работы материала.

Несмотря на высокую степень сходимости, в моделировании обнаружены некоторые ограничения. Основные расхождения наблюдаются на стадии линейной работы материала, что может быть обусловлено особенностями материалов и упрощениями, принятыми в модели. Для улучшения модели рекомендуется провести дальнейшие исследования, направленные на уточнение параметров и условий, а также на детализированный учет свойств материалов. В целом, результаты работы подтверждают возможность использования модели для точного прогнозирования поведения системы.

Заключение. В итоге проведенного исследования, которое включало сравнение экспериментальных результатов с моделированием в ANSYS для всех моделей (HS13-C0, HS13-CT, HS13-CT и HS13-00), получены следующие общие выводы:

все модели позволяют воспроизвести характерные пластические деформации и разрушение бетонных конструкций при максимальной нагрузке. Соответствие данных между результатами, полученными в результате испытаний образцов и расчетами, соответствующих численных моделей, показывают высокий процент сходимости. Наблюдаются минимальные различия между экспериментальными данными и результатами моделирования в ANSYS.

Результаты и выводы исследования могут быть полезны для дальнейших исследований, оптимиза-

ции и улучшения поведения сталебетонных конструкций, а также применения в инженерной практике для более точного прогнозирования деформаций и разрушения бетонных элементов с целью проведения самостоятельных экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Березовский В.Н., Кузнецов В.С., Долгих Н.И., Деревянко А.А. Бетонные и железобетонные конструкции: Учебник для вузов. б.м.: Академия, 2018.
2. Ведяков И.И., Конин Д.В., Крылов С.Б. Руководство по проектированию сталежелезобетонных конструкций. СТО АРСС 11251254.001-018-4. М.: АКЦИОМГРАФИКС ЮНИОН, 2018. 105 с.
3. American Concrete Institute. Требования к железобетонным конструкциям. М.: Стройиздат, 2019. 623 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. 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.
6. 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. C. 629–638.
7. 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 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 9. С. 49–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-49-59
8. 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.
9. 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.
10. Menetrey P. Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures. Lausanne: EPFL, 1994. Dissertation No. 1279. 179 p.
11. Caner F.C., Bažant Z.P. Microplane Model M7 for Plain Concrete. I: Formulation // Journal of

Engineering Mechanics © ASCE. 2013. Vol. 139. No. 12/ Pp. 1714–1723. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000570.

12.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.

13.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. 501–516

14.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.

15.Джонсон Р.П. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4: проектирование стале-железобетонных конструкций EN 1994-1-1. Москва: МИСИ-МГСУ, 2012. 413 с.

16.Idelsohn S.R. Analysis of Reinforced Concrete Structures Using Ansys Nonlinear Concrete Model // Computational Mechanics. 1998. Vol. 1(8). Pp. 451–460

17.MacGregor, James G. Reinforced concrete. – 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2011. 864 p.

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.

18.Кабанцев О.В., Крылов С.Б., Трофимов С.В. Numerical Analysis of Longitudinal Reinforcement Effect on Rc Slab Punching Shear Resistance by Strength and Crack Propagation Criteria // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17(1). Pp. 21–33. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-21-33.

19.Krajewski M., Hindelang S. Application of the Drucker-Prager Model for Reinforced Concrete Structures // International Journal of Structural Engineering. 2015. Vol. 6(3). Pp. 245–261.

20.Gonzalez A., Hiller M., and Kuhlmann U. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Using the Drucker-Prager Yield Criterion // Computers and Concrete. 2017. Vol. 19(4). Pp. 425–438.

21.Nilson A.H., Darwin D., Dolan C.W. Проектирование бетонных конструкций. Москва: Издательство "Стройиздат", 2015. 800 с.

22.American Concrete Institute. Требования к железобетонным конструкциям (ACI 318) и комментарии (ACI 318R). Москва: Издательство "Стройиздат", 2020. 623 с.

23.Wight J.K., MacGregor J.G. Железобетон: механика и проектирование. Москва: Издательский центр "Академия", 2012. 1184 с.

Поступила 10.11.2024 г.

© Тимофеев П.С., 2025

Timofeev P.S.

Siberian State University of Railway Transport

E-mail: pao.t@yandex.ru

INVESTIGATION OF THE CAPABILITIES OF NUMERICAL MODELING FOR THE DESIGN OF STEEL-CONCRETE CONNECTIONS BASED ON EXPERIMENTAL STUDIES OF FOREIGN RESEARCHERS

Abstract. This article presents a numerical study of the shear head (SH) joint in reinforced concrete-steel structures using the ANSYS software package. The relevance of using reinforced concrete-steel structures in the construction of multi-story buildings and infrastructure projects is due to their high strength, cost-effectiveness, and durability. However, the use of monolithic slabs with reinforced concrete columns is limited by construction complexity and architectural constraints. The aim of the study is to verify the reliability of results obtained in previous experiments and assess the accuracy of the finite element method for calculating shear joints. The study is based on the work of D.V. Bompa and A.Y. Elgazuli, which focused on the analysis of the connection between a steel column and a reinforced concrete slab. The results of the numerical modeling showed a high degree of convergence with the experimental data (up to 98%) and confirmed the feasibility of using the finite element method for accurately predicting the behavior of SH joints under various loads. The study also identified some limitations of the model, which require further refinement and a more detailed consideration of material properties to improve calculation accuracy. The findings can be used for optimizing the design of reinforced concrete-steel structures and enhancing their reliability in construction practice.

Keywords: *steel-concrete structures, shear head, numerical modeling, finite element method, ANSYS, nonlinear analysis, structural strength, comparison with experiment, geometric nonlinearity, shear loads.*

REFERENCES

1. Berezovsky V.N., Kuznetsov V.S., Dolgikh N.I., Derevyanko A.A. Concrete and Reinforced Concrete Structures: Textbook for Higher Education Institutions [Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii: Uchebnik dlya vuzov]. Moscow: Akademiya, 2018. 336 p. (rus)
2. Vedyakov I.I., Konin D.V., Krylov S.B. Guidelines for the Design of Steel-Concrete Structures [Rukovodstvo po proektirovaniyu stalezhelezo-betonnykh konstruksiy]. Moscow: AKSIOMGRAFIKS UNION, 2018. 105 p. (rus)
3. American Concrete Institute. Requirements for Reinforced Concrete Structures. Moscow: Stroyizdat, 2019. 623 p.
4. Brendel G. Stahlbetonbau unter Berücksichtigung des Spannbetons. Construction with Prestressed Steel-Concrete. Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1958. 350 p.
5. 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.
6. 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. Pp. 629–638.
7. Timofeev P.S. Numerical Study of the Operation of a Monolithic Beamless Floor Joint with a Steel-Concrete Column, Using a Shear Beam Joint, Taking into Account the Combined Work of Concrete and Steel [Chislennoe issledovanie raboty uzla monolitnogo bezbalochnogo perekrytiya so stalebetonnoi kolonnoy, s primeneniem sreznogo balochnogo uzla, s uchetom sovместnoi raboty betona i stali]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 9. Pp. 49–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-9-49-59. (rus)
8. 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.
9. 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(15). Pp. 161–183.
10. Menetrey P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Lausanne: EPFL, 1994. Dissertation No. 1279. 179 p.
11. Caner F.C., Bažant Z.P. Microplane Model M7 for Plain Concrete. I: Formulation. Journal of Engineering Mechanics © ASCE. 2013. Vol. 139, No. 12. Pp. 1714–1723. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000570.
12. Sousa R., Batalha N., Rodrigues H. Numerical Simulation of Beam-to-Column Connections in Precast Reinforced Concrete Buildings Using Fiber-Based Frame Models. Engineering Structures. 2020. Vol. 203. Article 109845.
13. 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. 501–516.
14. 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.
15. Johnson R.P. Designers' Guide to Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures EN 1994-1-1. Moscow: MGSU, 2012. 413 p. (rus)
16. Idelsohn S.R. Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model. Computational Mechanics. 1998. Vol. 1(8). Pp. 451–460.
17. MacGregor J.G. Reinforced Concrete. 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2011. 864 p.
18. Kabantsev O.V., Krylov S.B., Trofimov S.V. Numerical Analysis of Longitudinal Reinforcement Effect on RC Slab Punching Shear Resistance by Strength and Crack Propagation Criteria. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17(1). Pp. 21–33. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-21-33.
19. Krajewski M., Hindelang S. Application of the Drucker-Prager Model for Reinforced Concrete Structures. International Journal of Structural Engineering. 2015. Vol. 6(3). Pp. 245–261.
20. Gonzalez A., Hiller M., Kuhlmann U. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Using the Drucker-Prager Yield Criterion. Computers and Concrete. 2017. Vol. 19(4). Pp. 425–438.
21. Nilson A.H., Darwin D., Dolan C.W. Design of Concrete Structures [Proektirovanie betonnykh konstruksiy]. Moscow: Stroyizdat, 2015. 800 p. (rus)
22. American Concrete Institute. Requirements for Reinforced Concrete Structures (ACI 318) and Commentary (ACI 318R). Moscow: Stroyizdat, 2020. 623 p.

23. Wight J.K., MacGregor J.G. Reinforced Concrete: Mechanics and Design [Zhelezobeton: mekhanika i proektirovanie]. Moscow: Akademiya, 2012. 1184 p. (rus)

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 10.11.2024

Для цитирования:

Тимофеев П.С. Исследование возможностей численного моделирования для расчета сталебетонных узлов, на основе экспериментальных исследований зарубежных ученых // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 42–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-42-55

For citation:

Timofeev P.S. Investigation of the capabilities of numerical modeling for the design of steel-concrete connections based on experimental studies of foreign researchers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 42–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-42-55

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-56-68

Клековкин Е.А.

Ижевский Государственный Технический Университет имени М.Т. Калашникова

E-mail: z0h0e0n0y0a@gmail.com

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ В СРЕДЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Аннотация. Проанализирован процесс проектирования несущих конструкций с использованием информационного моделирования. Отмечена высокая трудоемкость вариантной проработки, сложность передачи данных между информационными и расчетными моделями несущих конструкций, не совершенность существующих инструментов конвертации информационных моделей в расчетные и наоборот. Предложено использование визуального программирования для создания скриптов, автоматизирующих информационное и аналитическое моделирование в САПР.

Рассмотрены возможности визуального программирования для формирования скриптов автоматизированного моделирования несущих конструкций. Рассмотрен алгоритм в среде визуального программирования для проектирования несущих конструкций промышленных зданий реализующий автоматизированное формирование расчетной и информационной модели каркаса по заданным параметрам здания и конструктивного решения.

Использование визуального программирования позволило параметризовать формирование информационной и аналитической моделей с автоматизированным приложением снеговой и ветровой нагрузок. Параллельное формирование моделей по настроенным в скрипте правилам повышает степень интегрированности проектирования и может снижать количество ошибок в моделях. Проведено сравнение трудозатрат при проектировании несущих конструкций параметризованным и не параметризованным способами на примере двух объектов строительства.

Выявлен прирост производительности проектирования при использовании параметрического скрипта на этапе информационного и аналитического моделирования. Рассмотренный подход может быть использован для вариантного проектирования и оптимизации конструктивных решений. Интерактивное изменение моделей при изменении входных параметров и непрерывная обратная связь по целевым показателям облегчают поиск оптимальных конструктивных решений. Параллельная генерация расчетной и информационной моделей посредством скриптов позволяет снизить трудоемкость разработки моделей по сравнению с последовательным методом.

Ключевые слова: параметризация, визуальное программирование, grasshopper, вариантное проектирование, оптимизация, алгоритмическое проектирование.

Введение. Проектирование несущих конструкций зданий и сооружений включает в себя, помимо информационного моделирования, еще и спектр расчетов конструкций и их систем, которые, как правило, производятся в специализированных программных комплексах, реализующих метод конечных элементов.

Множество исследователей обращаются к концепции параметризации не только информационного моделирования несущих конструкций зданий и сооружений [1], но и параметризации расчетов этих конструкций и интеграции информационного моделирования и конструктивного расчета в единый параметризованный процесс [2–6]. Целью исследований в этом направлении является объединение параметрического подхода, вариантного проектирования, метода конечных элементов (МКЭ) и многокритериальной оптимизации. Исследования показывают, что автоматизация вариантного проектирования значительно снижает его трудоемкость [7, 8]. Автоматизация достигается путем создания скриптов в

API программных комплексов, либо путем создания специализированных приложений [9–12]. Скрипты позволяют автоматизировать выполнение операций с большим количеством повторяющихся действий, например, моделирование конечных элементов [13] или приложение сложно-распределенных нагрузок [14]. Такие скрипты формируют параметрические связи между входными параметрами и получаемыми моделями, что позволяет за короткое время формировать большое количество вариантов решений [15]. Кроме того, с помощью скриптов можно упростить взаимодействие между ПО, а значит более эффективно передавать и использовать информацию [16, 17].

Решение задач автоматизации проектирования, дополнение функционала программных комплексов возможно также посредством визуального программирования, в частности сред Dynamo и Grasshopper. Модуль визуального программирования также присутствует в программе Сапфир Генератор [18]. Написание даже корот-

кого скрипта в API требует от пользователя специальных знаний из области программирования, которыми большинство проектировщиков не обладают. Поэтому у визуального программирования есть неоспоримое преимущество в этом свете – относительная легкость в освоении [19].

Визуальное программирование наиболее широко используется авторами исследований для автоматизации моделирования конструкций зданий сложной геометрии [20]. Отдельные исследования показывают эффективность применения визуального программирования и для приложения снеговых и ветровых нагрузок на сложные формы покрытий [21]. Среда Grasshopper применяют и для параметризации моделирования конструкций относительно простых по форме зданий промышленного назначения [22]. Визуальное программирование также применяется исследователями для оптимизации конструктивных расчетов [23].

Внесение любых изменений в расчетную модель может спровоцировать появление различных ошибок [24]. Поэтому параметризация расчетной модели за счет автоматизированного внесения изменений гипотетически должна значительно снижать количество ошибок в модели. Следствием уменьшения количества ошибок должно стать снижение трудозатрат на их исправление.

Цель данной работы – оценить эффективность применения визуального программирования для параметрического и алгоритмического проектирования несущих конструкций на примере моделирования каркаса промышленного

здания. Объект исследования – одноэтажный каркас промышленного здания, а предмет – автоматизация проектирования несущих конструкций в среде визуального программирования. Основная гипотеза заключается в том, что объединение параметрического моделирования конструкций и параметрического формирования расчетной схемы с автоматизированным приложением нагрузок в едином скрипте позволит получить прирост производительности при моделировании несущих конструкций одноэтажных промышленных зданий.

Материалы и методы. В машиностроении широко распространен подход Knowledge Based Engineering (KBE) [25]. Данный подход основан на автоматизации повторяющихся процессов проектирования с целью дать возможность инженеру исследовать большее число возможных проектных решений. Первой ступенью на пути к реализации данного подхода в сфере проектирования несущих строительных конструкций является автоматизация этапа моделирования с помощью параметризации.

Для параметрического и алгоритмического проектирования несущих конструкций используется алгоритм в среде визуального программирования [26]. Параметризация заключается в определении характеристик объектов модели (в первую очередь геометрических) через математические функции. Таким образом, для построения и изменения объекта необходимо изменить лишь входные параметры.

Алгоритм представляет собой скрипт в среде визуального программирования (рис. 1) [26].

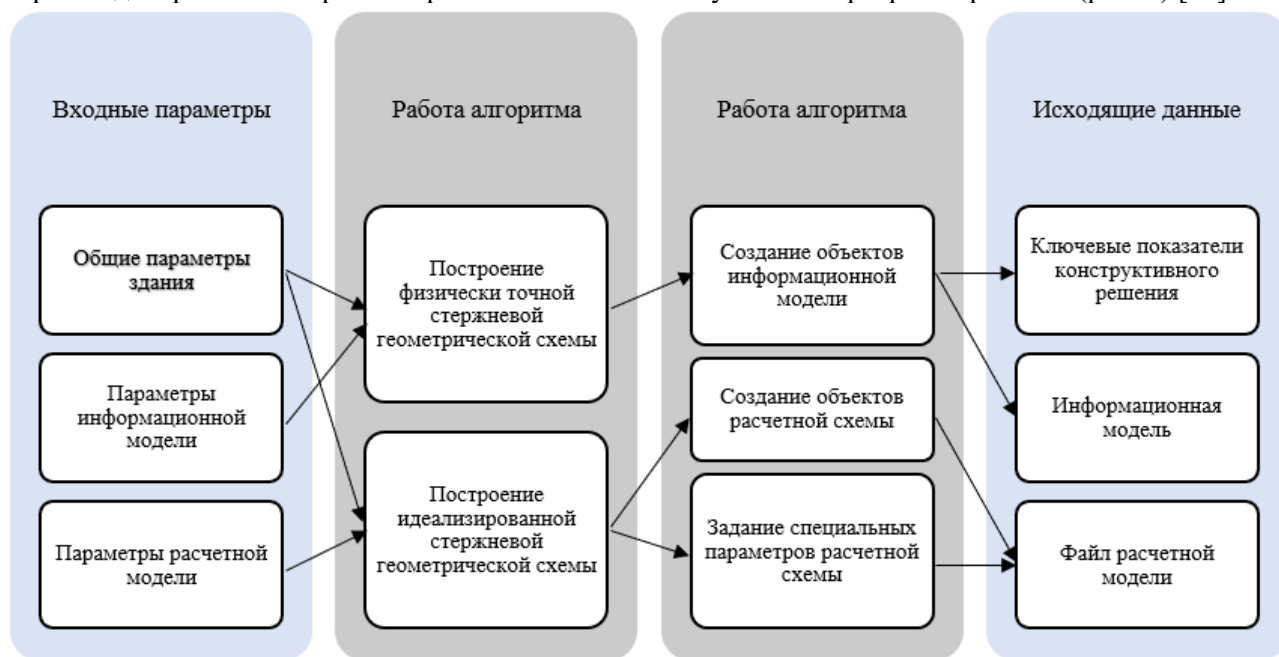


Рис. 1. Общая схема работы алгоритма

Скрипт имеет блочную структуру. Каждый из блоков скрипта решает конкретную подзадачу

(рис. 2). Разбиение скрипта на блоки повышает его трансформируемость – то есть возможность

переработки для генерации моделей несущих конструкций других типов зданий.

Блок входных данных включает в себя следующие параметры (рис. 2):

- Тип ригеля;
- Пролет стропильной конструкции, мм;
- Уклон кровли, %;

- Количество шагов поперечных рам;
- Шаг колонн, мм;
- Высота колонн, мм;
- Тип фермы;
- Высота фермы на опоре, мм;
- Количество панелей на полпролета фермы.



Рис. 2. Схема алгоритма формирования расчетной модели

SCAD по умолчанию оперирует значениями геометрических характеристик в метрах, а Tekla Structures требует введения значений в миллиметрах. Если сгенерированную скриптом геометрическую схему каркаса импортировать в SCAD без изменений, то фактические размеры схемы

SCAD будут увеличены в 1000 раз. Чтобы избежать этого эффекта, входные параметры геометрической схемы для ветки скрипта, генерирующей расчетную модель, уменьшаются в 1000 раз с помощью компонента «expression».

Схема части алгоритма, генерирующей информационную модель, представлена на рис. 3.

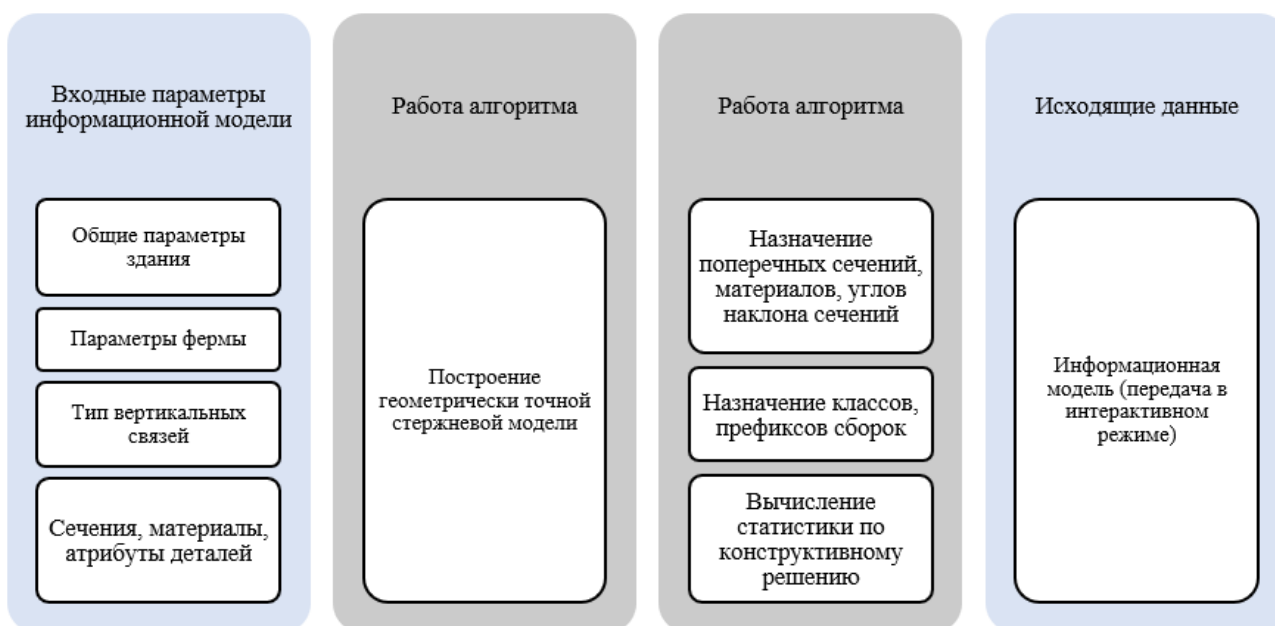


Рис. 3. Схема алгоритма формирования информационной модели

кровли (рис. 6). Как правило, оптимальные значения данных показателей для здания находятся в заранее известном диапазоне. Таким образом, еще до создания расчетного файла и до проверки конструкций на прочность и устойчивость инженер может оценить, попадает ли рассматриваемый вариант конструктивного решения в область

оптимальных решений. Возможность провести такую оценку позволяет отбросить часть вариантов уже на первом этапе. При этом экономится время, которое могло бы быть потрачено на создание и проверку расчетных схем таких вариантов.

Рис. 6. Фрагмент скрипта, выводящий статистику по целевым параметрам каркаса

В скрипте реализован автоматизированный сбор ветровых и снеговых нагрузок. В блоке

входных данных для сбора нагрузок задается ветровой и снеговой районы согласно СП20, тип местности и вес конструкции покрытия (рис. 7).

Рис. 7. Блок входных параметров для задания нагрузок на каркас

Основная часть. Для оценки эффективности скрипта было проведено сравнение трудозатрат на проектирование несущих конструкций объекта с помощью трёх методик.

Методика №1 характеризовалась рутинным формированием информационной модели без использования средств автоматизации. Передача данных между ПО для информационного моделирования и прочностного расчета проводилась с помощью экспорта/импорта через формат IFC. После чего расчетная модель дорабатывалась в расчетном комплексе.

Методика №2 имела отличие от первой в части передачи данных между ПО. Информационная модель формировалась не параметризованным способом, затем формировалась аналитическая модель в интерфейсе программы информационного моделирования с помощью стандартного инструмента. Затем проводилась передача подготовленной аналитической модели в расчетный комплекс и доработка модели в расчетном комплексе.

Методика №3 характеризовалась использованием параметрического скрипта в среде визуального программирования для формирования как информационной, так и расчетной моделей.

Трудоемкость подсчитывалась для 4 этапов независимо:

- 1) формирование информационной модели каркаса LOD200;
- 2) формирование расчетной стержневой модели каркаса;
- 3) внесение изменений в сформированную информационную модель каркаса LOD 200 в процессе дальнейшей работы над проектом;
- 4) внесение изменений в сформированную расчетную стержневую модель в процессе дальнейшей работы над проектом.

Автором были сформированы информационные и расчетные модели объектов по методике №1, в результате чего получены данные о трудоемкости этапов. Затем были использованы информационные модели объектов, полученные по методике №1 для передачи данных в расчетный комплекс и доработки расчетной модели по методике №2, в результате чего получены данные о трудоемкости формирования расчетной модели для методики №2. Затем были заново сформированы модели объектов по методике №3 с помощью параметрического скрипта и получены данные о трудоемкости этапов.

Для сравнения методик были выбраны два объекта, для которых автором разрабатывались

несущие конструкции раздела КМ. Справочная информация об объектах представлена в табл. 1. Информационная модель каркаса здания, разработанная с использованием скрипта представлена на рис. 8.

Расчетная модель каркаса промышленного здания, полученная с помощью алгоритма представлена на рис. 9.

Таблица 1

Параметры объектов строительства, выбранных для тестирования алгоритма

Номер	Параметр	Объект строительства 1	Объект строительства 2
1	Площадь объекта, м ²	2880	972
2	Размеры «в осях», м	30×96	18×54
3	Шаг колонн, м (крайних/средних)	6/12	6/6
4	Назначение объекта	Навес для сельхозтехники	Склад
5	Количество пролетов здания	2	1
6	Длина пролета фермы	15	18
7	Тип стропильной конструкции	Ферма с параллельными поясами	Трапецевидная ферма

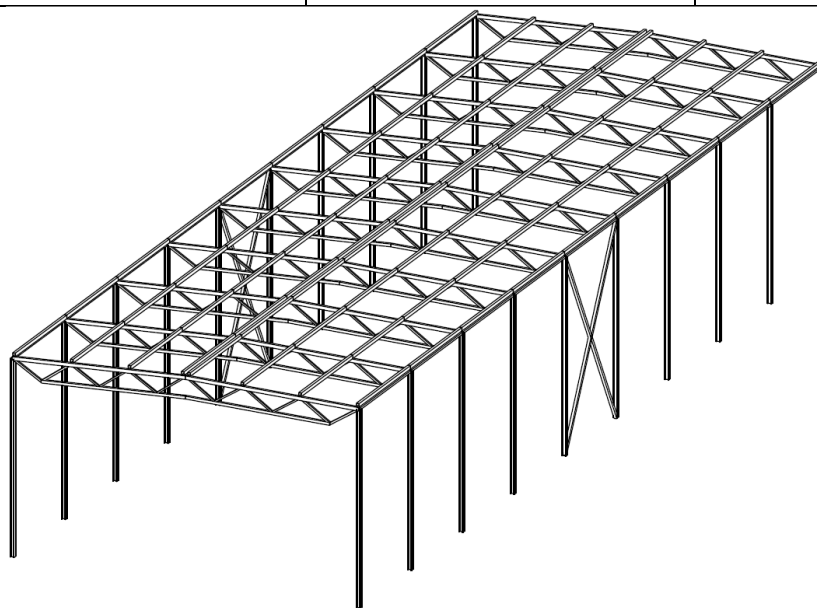


Рис. 8. Информационная модель каркаса, полученная с помощью алгоритма

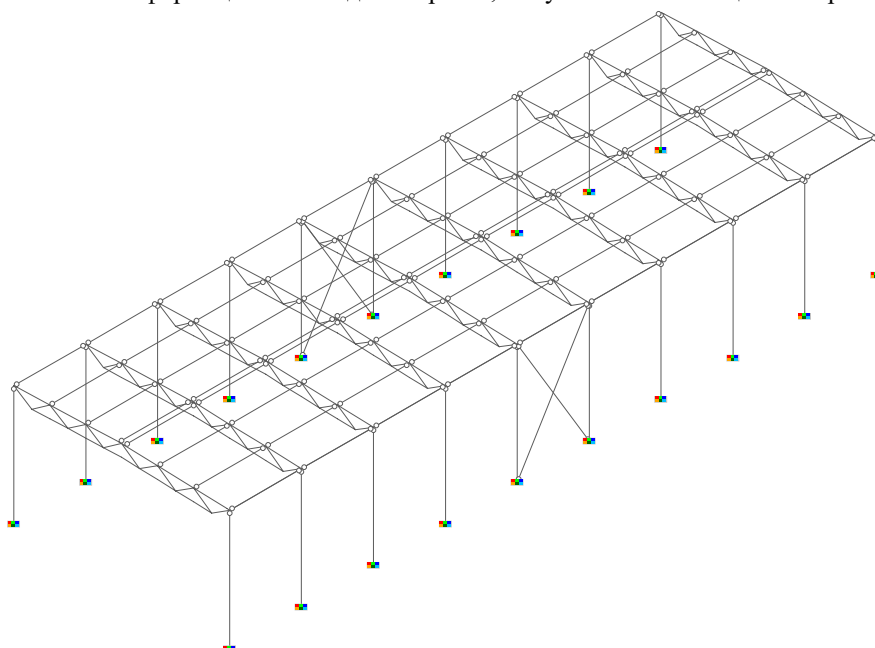


Рис. 9. Расчетная модель каркаса, полученная с помощью алгоритма

Применение скрипта снижает трудоемкость процесса проектирования. Рассчитать количество объектов, при котором снижение трудоемкости превышает трудозатраты на проектирование можно по формуле (1) [28]:

$$\frac{T}{x \cdot (t - t_{ps})} \leq 1 \quad (1)$$

где T – трудоемкость создания скрипта параметрического проектирования, ч;

– трудоемкость проектирования несущих конструкций объекта без параметрического скрипта, ч;

– трудоемкость проектирования несущих конструкций объекта с параметрическим скриптом, ч;

x – количество объектов, которые могут быть спроектированы с использованием скрипта.

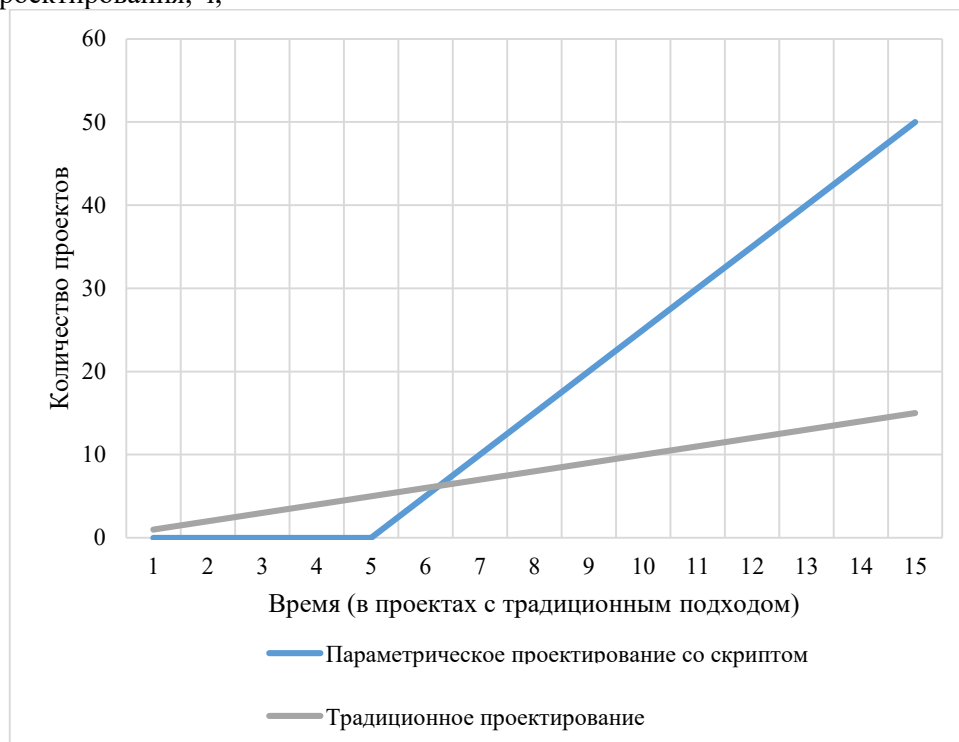


Рис. 10. График количества проектов в зависимости от времени

При этом минимальное количество типовых объектов для проектирования по параметрическому скрипту, при котором выполняется условие (1) можно выразить по формуле (2).

$$x \geq \frac{T}{(t - t_{ps})} \quad (2)$$

Оценка эффективности скрипта проводилась сравнением трудоемкости проработки информационной и расчетной моделей тремя различными методами: моделированием без параметризации и экспортом модели через IFC, моделированием без параметризации и экспортом модели через встроенный плагин, моделирование с помощью параметрического скрипта, разработанного автором.

Данные о трудоемкости разработки моделей по различным методикам представлены в табл. 2.

Так как трудоемкость разработки чертежей остается неизменной, то в сравнении она не учитывалась.

По результатам видно, что использование параметрического плагина сокращает трудоем-

кость проработки варианта конструктивного решения каркаса здания на 20,3 % относительно метода 2, трудоемкость проработки информационной модели сокращается на 30 %, а трудоемкость проработки аналитической модели сокращается на 23,08 % процента относительно метода 1 и на 13% относительно метода 2. При этом возможно сокращение трудозатрат на внесение изменений в информационную модель, в том случае, когда правки заключаются в изменении параметризованного в скрипте параметра конструкций (шага/пролета конструкций и т.п.).

При этом на разработку скрипта для работы над объектом №2 автором было затрачено 32 часа, а на доработку скрипта для работы над объектом №1 автором было дополнительно затрачено 11 часов.

Для объекта №2 минимальное необходимое количество проектов при котором написание скрипта оправдывает затраты находится по формуле (2):

$$x \geq \frac{T}{(t - t_{ps})} = \frac{32}{(33 - 22)} = 2,9$$

Таблица 2

Трудоёмкость проектирования несущих конструкций объектов по этапам

		Трудоёмкость проработки варианта, чел.-ч											
Методика		«Ручная» сборка модели, обмен данными через IFC				«Ручная» сборка модели, обмен данными через встроенный плагин				Проектирование с параметрическим плагином			
Этап работ	Объект	ИМ	АМ	изм ИМ	изм АМ	ИМ	АМ	изм ИМ	изм АМ	ИМ	АМ	изм ИМ	изм АМ
		ИМ	АМ	изм ИМ	изм АМ	ИМ	АМ	изм ИМ	изм АМ	ИМ	АМ	изм ИМ	изм АМ
	Объект 1	20	16	8	2	20	15	8	1	15	13	8	1
	Объект 2	17	10	3	3	17	8	3	2	11	7	2	2
	Интегральный показатель	37	26	11	5	37	23	11	3	26	20	10	3
	Доля от наиболее трудоёмкого варианта, %	100	100	100	100	100	88,46	100	60	70,27	76,92	90,9	60
	Прирост производительности труда, %	0	0	0	0	0	11,54	0	40	29,73	23,08	9,1	40

Для объекта №1, рассматривая трудо-затраты на создание скрипта как сумму затрат на разработку первоначального вариант и его доработку:

$$x \geq \frac{T}{(t - t_{ps})} = \frac{(32 + 11)}{(46 - 37)} = 4,7$$

Однако, если учесть, что скрипт для каждого последующего нового типа здания будет разрабатываться на основе существующих наработок, то в таком случае необходимо учесть только затраты на доработку существующего скрипта. Таким образом, минимальное количество типовых проектов составит:

$$x \geq \frac{T}{(t - t_{ps})} = \frac{11}{(46 - 37)} = 1,2$$

Следовательно, эффект от внедрения параметрического моделирования посредством скриптов носит накопительный характер. При условии наличия наработок в виде скриптов для других типов зданий, эти наработки могут использоваться при создании новых скриптов путем заимствования отдельных частей алгоритма, отвечающих за создание геометрической схемы каркаса или за автоматический сбор нагрузок.

В дальнейшем автор планирует продолжить исследования возможности применения параметрического моделирования для свободного поиска конструктивного решения с обратной связью по целевым показателям. Оценку решений предполагается проводить методом анализа иерархий [29]. Последующим развитием подхода послужит параметрическое моделирование каркаса с учетом деталей узлов на основе библиотечных элементов [30].

Выводы. Использование скриптов для автоматизации рутинных операций позволяет снижать трудоёмкость моделирования несущих конструкций, на рассмотренных примерах получен эффект в виде снижения трудоёмкости в пределах 9–40 %.

Рассчитан условный «срок окупаемости» трудо-затрат на разработку скриптов. Трудо-затраты на разработку скриптов перекрываются накопленным эффектом от снижения трудоёмкости при проектировании 2,9–4,7 типовых объектов по данным рассмотренных примеров.

Применение инструментов формирования аналитической модели в комплексе информационного моделирования требует точной настройки правил идеализации модели. Параллельное формирование расчетной и информационной моделей позволяет получить точно соответствующие модели без дополнительных трудо-затрат на идеализацию расчетной модели, что повышает интегрированность конструктивного проектирования. Полученные результаты позволяют предположить, что параллельная генерация расчетной и информационной моделей позволяет снизить трудоёмкость проектирования по сравнению с последовательным методом, при котором используется конвертация информационной модели в расчетную.

Рассмотренный в данной статье подход может быть использован для автоматизации вариантного проектирования несущих конструкций на начальном этапе проработки. С помощью скрипта могут быть быстро сгенерированы несколько вариантов каркаса здания, а полученные в результате информационные и расчетные модели могут быть использованы на последующих этапах при более детальной проработке решений. В результате эффект снижения трудоёмкости ва-

риантной проработки может привести к повышению качества проектных решений. Для оценки и выбора наилучшего варианта целесообразно использовать метод анализа иерархий.

Стоит отметить, что эффект от параметризации информационного моделирования может быть значительно повышен при увеличении степени детализации модели. Применительно к металлическому каркасу может быть реализовано моделирование узлов конструкций по заранее настроенным компонентам – пользовательским библиотечным элементам. В результате может быть получена точная спецификация металла, учитывающая элементы соединений конструкций, уже на стадии предпроектной проработки, что в перспективе значительно повысит качество принимаемых проектных решений.

В статье проведена оценка эффективности скриптов для автоматизации проектирования на конкретных примерах. Заслуживают дальнейших исследований вопросы эффективности скриптов в различных условиях применения, в зависимости от их сложности, функционала, параметров моделируемых объектов. В этом свете важная задача – оценка целесообразности написания скрипта для заранее известной задачи проектирования. Такой задачей может быть проектирование уникального технически сложного объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Травуш В.И. Цифровые технологии в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 3. С. 107–117. DOI 10.22337/2077-9038-2018-3-107-117. EDN VJBYXC.
2. Martini K. Optimization and parametric modelling to support conceptual structural design // International Journal of Architectural Computing. 2011. № 9(2). Pp. 151–166. DOI:10.1260/1478-0771.9.2.151
3. Danhaive R.A., Mueller C.T. Combining parametric modeling and interactive optimization for high-performance and creative structural design // Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2015.
4. Rolvink A., van de Straat R., Coenders J. Parametric Structural Design and beyond // International Journal of Architectural Computing. 2010. № 8(3). Pp. 319–336. DOI:10.1260/1478-0771.8.3.319
5. Reisinger J., Knoll M., Kovacic I. Parametric Structural Design for automated Multi-Objective Optimization of Flexible Industrial Buildings // Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2020: From Demonstration to Practical Use - To New Stage of Construction Robot. 2020.
6. Apellániz D., Vierlinger R. Enhancing structural design with a parametric FEM toolbox // Steel Construction. 2022. № 15(3). Pp. 188–195. DOI:10.1002/stco.202200004
7. Lee S.II, Bae J.S., Cho Y.S. Efficiency analysis of Set-based Design with structural building information modeling (S-BIM) on high-rise building structures // Automation in Construction. 2012. № 23(2) Pp. 20–32. DOI:10.1016/j.autcon.2011.12.008
8. Rempling R., Mathern A., Ramos D.T., Fernández S.L. Automatic structural design by a set-based parametric design method // Automation in Construction. 2019. №. 108. 102936 DOI:10.1016/j.autcon.2019.102936
9. Aish R., Bredella N. The evolution of architectural computing: From Building Modelling to Design Computation // Architectural Research Quarterly. 2017. № 21(1). Pp. 65–73. DOI:10.1017/S1359135517000185
10. Buelow P. Von. Paragen: Performative exploration of generative systems // Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2012. № 53(4). Pp. 271–284
11. Василькин А.А. К интегрированию инструментов структурной оптимизации в САПР // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 55–60. EDN YLLDGH.
12. Зоткина И.А., Игнатова Е.В. Автоматизация расчета воздухообмена в помещениях на основе данных информационной модели здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 73–78. EDN YLLDHF.
13. Бабчук В.И., Шилова Л.А., Евстратов В.С. Автоматизация процесса армирования подпорной стенки гидротехнического сооружения // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 12. С. 37–44. DOI 10.33622/0869-7019.2022.12.37-44. EDN PGVYEG.
14. Семенов А.А., Сафиуллин М.Н., Порываев И.А., Маляренко А.А. Автоматизированное создание расчетных моделей SCAD при помощи средств API // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 32–35. EDN RYGLFL.
15. Салех М.С. Особенности разработки уникальных архитектурных решений с использованием цифровых методов на основе визуального программирования // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5, № 1. С. 54–59. DOI 10.34031/2618-7183-2022-5-1-54-59. EDN NOYMKD.
16. Sattler L., Lamouri S., Pellerin R., Maigne T. Interoperability aims in building information modeling exchanges: A literature review // IFAC-PapersOnLine. 2019. №52(13). Pp. 271–276. DOI:10.1016/j.ifacol.2019.11.180

17. Fedorik F., Makkonen T., Heikkilä R. Integration of BIM and FEA in automation of building and bridge engineering design // ISARC 2016 - 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2016. DOI:10.22260/ISARC2016/0089

18. Тищенко Д. Система визуального программирования САПФИР-ГЕНЕРАТОР - компонент BIM-технологии // САПР и графика. 2018. Т. 4, № 258. С. 12–15.

19. Клековкин Е.А., Сунцов А.С. Применение визуального программирования для задач автоматизации в строительстве // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14, № 2. С. 128–143. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.10. EDN SRAXWK.

20. Георгиев Н.Г., Шумилов К.А., Семенов А.А. Визуальное программирование в задачах моделирования строительных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 4(38). С. 117–123. DOI 10.52684/2312-3702-2021-38-4-117-123. EDN ZPSGCJ.

21. Дагаев В.А., Пурвин Г.М., Школяр Ф.С. Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок на вантовое покрытие двоякой кривизны // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18, №11 С. 1713–1730. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730

22. Курс Grasshopper для инженера [Электронный ресурс]. URL: https://www.structuristik.com/grasshopper_dlya_ingenera (дата обращения: 26.09.2024).

23. Недвига П.Н., Кукина А.А., Тачков М.А. Оптимизация конструктивных расчетов свайного поля на основе данных статического зондирования // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13, № 4. С. 19–48. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.2. EDN HDGSOW.

24. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 4-е изд., перераб. Москва: Издательство СКАД СОФТ, 2011. 736 с.

25. Verhagen W.J.C., Bermell-Garcia P., Dijk R.V., Curran R. A critical review of Knowledge-

Based Engineering: An identification of research challenges // Advanced Engineering Informatics. 2012. № 26(1). Pp. 5–15. DOI: 10.1016/j.aei.2011.06.004

26. Сунцов А.С., Клековкин Е.А. Алгоритм параметризации разработки информационной и аналитической моделей каркасов одноэтажных промышленных зданий с использованием визуального программирования // Строительное производство. 2024. № 1. С. 80–85. DOI: 10.54950/26585340_2024_1_80. EDN FRJOMV.

27. Наумов А.Е., Кучеренко А.С., Бобровников Е.А., Корольская А.И. Параметрические библиотечные элементы как эффективное средство совершенствования технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-20-28. EDN ALCZUO.

28. Клековкин Е.А. Параметризация моделирования каркасов одноэтажных промышленных зданий с балочной системой покрытия в среде grasshopper // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры: Материалы VII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 мая 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. С. 340–347. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.046. EDN CGIKEJ.

29. Darko A., Chan A.P.C., Effah E.F., Owusu E.K., Pärn E.A., Edwards D.J. Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction // International Journal of Construction Management. 2019. №19(5). Pp. 436–452. DOI: 10.1080/15623599.2018.1452098

30. Rybakova A. Development of an Integrated Information Model Based on Standard Modular Elements of the Maximum Readiness Basis // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. № 231. Pp. 211–219. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_22

Информация об авторах

Клековкин Евгений Алексеевич, аспирант кафедры промышленное и гражданское строительство. E-mail: z0h0e0n0y0a@gmail.com. Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова. 426069, Удмуртская Республика, Ижевск, улица Студенческая, д.42.

Поступила 20.11.2024 г.

© Клековкин Е.А., 2025

Klekovkin E.A.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University

E-mail: z0h0e0n0y0a@gmail.com.

ALGORITHMIC DESIGN OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF INDUSTRIAL BUILDINGS USING VISUAL PROGRAMMING

Abstract. The process of designing load-bearing structures using information modelling is analysed. High labour intensity of variant elaboration, complexity of data transfer between information and structural models of load-bearing structures, non-perfection of existing tools for converting information models into structural models and vice versa are noted. The use of visual programming for creation of scripts automating information and analytical modelling in CAD is suggested.

The possibilities of visual programming for forming scripts of automated modelling of load-bearing structures are considered. The algorithm in the visual programming environment for designing load-bearing structures of industrial buildings, which realises the automated formation of the design and information model of the frame according to the given parameters of the building and structural solution, is considered.

The use of visual programming allowed parameterised formation of information and analytical models with automated application of snow and wind loads. Parallel formation of models according to the rules configured in the script increases the degree of design integration and can reduce the number of errors in the models. The comparison of labour costs in the design of load-bearing structures by parametrized and non-parametrized methods on the example of two construction objects has been carried out.

The increase of design productivity at the stage of information and analytical modelling when using parametric script has been revealed. The considered approach can be used for variant design and optimisation of structural solutions. Interactive change of models at change of input parameters and continuous feedback on target indicators facilitate the search of optimal design solutions. Parallel generation of design and information models by means of scripts allows to reduce the labour intensity of model development in comparison with the sequential method.

Keywords: parameterisation, visual programming, grasshopper, variant design, optimisation, algorithmic design

REFERENCES

1. Travush V.I. Digital technologies in construction [Cifrovye tekhnologii v stroitel'stve]. Academia. Architecture and construction. 2018. Vol. 3 Pp. 107–117. DOI 10.22337/2077-9038-2018-3-107-117. EDN VJBYXC. (rus.)
2. Martini K. Optimization and parametric modelling to support conceptual structural design. International Journal of Architectural Computing. 2011. Vol. 9(2). Pp. 151–166. DOI: 10.1260/1478-0771.9.2.151
3. Danhaive R.A., Mueller C.T. Combining parametric modeling and interactive optimization for high-performance and creative structural design. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2015.
4. Rolvink A., van de Straat R., Coenders J. Parametric Structural Design and beyond. International Journal of Architectural Computing. 2010. Vol. 8(3). Pp. 319–336. DOI: 10.1260/1478-0771.8.3.319
5. Reisinger J., Knoll M., Kovacic I. Parametric Structural Design for automated Multi-Objective Optimization of Flexible Industrial Buildings. Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2020: From Demonstration to Practical Use - To New Stage of Construction Robot. 2020.
6. Apellániz D., Vierlinger R. Enhancing structural design with a parametric FEM toolbox. Steel Construction. 2022. Vol. 15(3). Pp. 188–195. DOI:10.1002/stco.202200004
7. Lee S.II, Bae J.S., Cho Y.S. Efficiency analysis of Set-based Design with structural building information modeling (S-BIM) on high-rise building structures. Automation in Construction. 2012. Vol. 23(2) Pp. 20–32. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.12.008
8. Rempling R., Mathern A., Ramos D.T., Fernández S.L. Automatic structural design by a set-based parametric design method. Automation in Construction. 2019. Vol. 108. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102936
9. Aish R., Bredella N. The evolution of architectural computing: From Building Modelling to Design Computation. Architectural Research Quarterly. 2017. Vol. 21(1). Pp. 65–73. DOI: 10.1017/S1359135517000185
10. Buelow P. Von. Paragen: Performative exploration of generative systems. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2012. Vol. 53(4). Pp. 271–274
11. Vasilkin A.A. To integration of tools of structural organization into CAD [K integrirovaniyu instrumentov strukturnoj optimizacii v

SAPR]. Industrial and Civil Engineering. 2018. Vol. 9. Pp. 55–60. EDN YLLDGH. (rus)

12. Zotkina I.A., Ignatova E.V. Automation of calculation of air exchange in premises on the basis of building information model data [Avtomatizatsiya rascheta vozduhoobmena v pomeshcheniyah na osnove dannyh informacionnoj modeli zdaniya]. Industrial and Civil Engineering. 2018. Vol. 9. Pp. 73–78. EDN YLLDHF. (rus)

13. Babchuk V. I., Shilova L. A., Evstratov V. S. Automation of the process of reinforcing the retaining wall of a hydraulic structure [Avtomatizatsiya processa armirovaniya podpornoj stenki gidrotekhnicheskogo sooruzheniya]. Industrial and Civil Engineering. 2022. Vol. 12. Pp. 37–44. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.12.37-44. EDN PGVYEG. (rus)

14. Semenov A.A., Safiullin M.N., Porivaev I.A., Malyarenko A.A. Automated generation of scad simulation models using api tools [Avtomatizirovannoe sozdanie raschetnyh modelej SCAD pri pomoshchi sredstv API]. Industrial and Civil Engineering. 2014. Vol. 3. Pp. 32–35. EDN RYGLFL. (rus)

15. Saleh M. Features of developing unique architectural solutions using digital methods based on visual programming [Osobennosti razrabotki unikal'nyh arhitekturnykh reshenij s ispol'zovaniem cifrovyyh metodov na osnove vizual'nogo programmirovaniya]. Construction Materials and Products. 2022. Vol. 5(1). Pp. 54–59. DOI 10.34031/2618-7183-2022-5-1-54-59. EDN NOYMKD. (rus)

16. Sattler L., Lamouri S., Pellerin R., Maigne T. Interoperability aims in building information modeling exchanges: A literature review. IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52(13). Pp. 271–276. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.180

17. Fedorik F., Makkonen T., Heikkilä R. Integration of BIM and FEA in automation of building and bridge engineering design. ISARC 2016 - 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2016. DOI: 10.22260/ISARC2016/0089

18. Tishchenko D. Sapfir-generator visual programming system - a component of BIM-technology [Sistema vizual'nogo programmirovaniya SAPFIR-GENERATOR - komponent BIM-tehnologii]. CAD and graphics. 2018. Vol. 4(258). Pp. 12–15. (rus)

19. Klekovkin E.A., Suntsov A.S. Application of visual programming for automation tasks in construction [Primenenie vizual'nogo programmirovaniya dlya zadach avtomatizatsii v stroitel'stve]. Construction and geotechnics. 2023. Vol. 14(2). Pp. 128–143. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.10. EDN SRAXWK. (rus.)

20. Georgiev N. G., Shumilov K. A., Semenov A. A. Visual programming in the problems of modeling building structures [Vizual'noe programmirovaniye v zadachah modelirovaniya stroitel'nykh konstrukcij]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2021. Vol. 4(38). Pp. 117–123. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-38-4-117-123. EDN ZPSGCJ. (rus.)

21. Dagaev V.A., Purvin G.M., Shkoliar F.S. Optimization of determination and application of complexly distributed loads on a double curvature cable-stayed covering [Optimizatsiya opredeleniya i prilozheniya slozhnoraspredelennykh nagruzok na vantovoe pokrytie dvoyakoj krivizny]. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023. Vol. 18(11). Pp. 1713–1730. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730 (rus)

22. Grasshopper course for engineer [Kurs Grasshopper dlya inzhenera]. URL: https://www.structuristik.com/grasshopper_dlya_ingenera (date of treatment: 26.09.2024).

23. Nedviga P.N., Kukina A.A., Tachkov M.A. Optimization of pile field structural calculations based on CPT data [Optimizatsiya konstruktivnykh raschetov svajnogo polya na osnove dannyh staticheskogo zondirovaniya]. Construction: Science and Education. 2023. Vol. 13(4). Pp. 19–48. (rus)

24. Perelmutter A.V., Slivker V.I. Analytical models of structures and possibility of their analysis [Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost' ih analiza]. 4th. ed. Moscow: Publisher SCAD Soft, 2011. 736 p. (rus)

25. Verhagen W.J.C., Bermell-Garcia P., Dijk R. V., Curran. R. A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. Advanced Engineering Informatics. 2012. Vol. 26(1). Pp. 5–15. DOI:10.1016/j.aei.2011.06.004

26. Suntsov A. S., Klekovkin E. A. Algorithm of parameterization of information and analytical model developing using visual programming [Algoritm parametrizatsii razrabotki informacionnoj i analiticheskoy modelej karkasov odnoetazhnykh promyshlennykh zdaniy s ispol'zovaniem vizual'nogo programmirovaniya]. Construction Production. 2024. Vol. 1. Pp. 80–85. DOI: 10.54950/26585340_2024_1_80. EDN FRJOMV. (rus.)

27. Naumov A., Kucherenko A., Bobrovnikov E., Korolskaya A. Parametric library elements as an effective tool for improving information modeling technologies in construction [Parametricheskie bibliotechnye elementy kak effektivnoe sredstvo sovershenstvovaniya tekhnologij informacionnogo modelirovaniya v stroitel'stve]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. Vol. 8(2). Pp. 20–

28. DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-2-20-28. EDN ALCZUO. (rus)

28. Klelovkin E. A. Parametrization of modeling of load-bearing structures of one-storey industrial buildings with a girder roofing system using grasshopper [Parametrizaciya modelirovaniya kar-kasov odnoetazhnyh promyshlennyh zdaniy s balo-chnoj sistemoj pokrytiya v srede grasshopper]. Proceedings of VII international conference BIM in construction and architecture. 2024. Pp. 340–347. DOI 10.23968/BIMAC.2024.046. EDN CGIKEJ. (rus)

29. Darko A., Chan A.P.C., Effah E.F., Owusu E. K., Pärn E. A., Edwards D. J. Review of applica-tion of analytic hierarchy process (AHP) in con-struction. International Journal of Construction Management. 2019. Vol. 19(5) Pp. 436–452. DOI:10.1080/15623599.2018.145209830.

30. Rybakova A. Development of an Integrated Information Model Based on Standard Modular El-ements of the Maximum Readiness Basis. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 231. Pp. 211–219. DOI: 10.1007/978-3-030-96206-7_22

Information about the authors

Klekovkin, Evgenii A. Postgraduate student. E-mail: z0h0e0n0y0a@gmail.com. Kalashnikov Izhevsk State Technical University; 42 Studencheskaya street, Izhevsk, 426069

Received 20.11.2024

Для цитирования:

Клековкин Е.А. Алгоритмическое проектирование несущих конструкций промышленных зданий в среде визуального программирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 56–68. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-56-68

For citation:

Klekovkin E.A. Algorithmic design of load-bearing structures of industrial buildings using visual program-ming. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 56–68. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-56-68

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-69-83

Ли Яньбо

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: 525046210@qq.com

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ ДОМОВ ПРЕСТАРЕЛЫХ

Аннотация. Исследование современных домов престарелых приобретает всё большую актуальность на фоне ускоряющегося процесса старения населения, а также изменения социальных и экономических условий. Важно подчеркнуть, что понимание тенденций в развитии таких учреждений имеет ключевое значение для типологического анализа их архитектурных решений. Это позволяет не только адаптировать дома престарелых к современным потребностям пожилых людей, но и улучшить их функциональность и комфорт. В связи с этим особенно важно выявить основные направления и тенденции в развитии современных домов престарелых.

Цель данного исследования заключается в выявлении основных тенденций архитектурной организации современных домов престарелых. Для достижения этой цели был проведён комплексный анализ китайского и зарубежного опыта домов престарелых.

Методы исследования включают: изучение научных, литературно-публицистических и источников, интернет-ресурсов, посвящённых вопросам развития архитектуры домов престарелых; анализ проектно-графических и фотографических материалов, иллюстрирующих практику проектирования и строительства домов престарелых в Китае и зарубежом.

В ходе исследования были выявлены ключевые тенденции в развитии градостроительных, функционально-планировочных и объёмно-пространственных решений для домов престарелых. К наиболее важным и распространённым тенденциям следует отнести развитие услуг по уходу за престарелыми, улучшение безбарьерных систем, многофункциональность, формирование общественных пространств для проведения досуга пожилых людей, автономность жилых ячеек, кооперация домов престарелых с медицинскими центрами.

Ключевые слова: дома престарелых, зарубежный и китайский опыт, тенденции развития, градостроительные решения, функционально-планировочные структуры, пространственно-объёмные решения.

Введение. К настоящему времени Китай вошёл в число умеренно стареющих стран. К 2050 году весь мир перейдет в категорию умеренно стареющего общества, а Китай по степени старения в основном приблизится к развитым странам и даже догонит такие густонаселенные страны, как Индия и Россия [1]. Индустрия ухода за пожилыми людьми будет развиваться быстрыми темпами, включая развитие домов престарелых (далее ДП).

В 1950-е годы существенный прирост численности пожилого населения, а также увеличение расходов на медицинское обслуживание способствовали стремительному развитию домов престарелых как специфической формы архитектурного проектирования и строительства. [2]. Пожилые люди считают, что в домах престарелых их не уважают, что у них нет ни самостоятельности, ни личного пространства, а семьи относятся к домам престарелых как к неизбежной, последней остановке, с которой они не хотят сталкиваться [3].

В Китае при активной поддержке национальной политики и активном участии общественных организаций сектор ухода за пожилыми людьми демонстрирует динамичное разви-

тие, а количество учреждений по уходу за пожилыми людьми стремительно растет [4]. Тем не менее, из-за недостатка соответствующего опыта возник ряд проблем. В частности, наблюдается неравномерное распределение домов престарелых, институционализация среды проживания в данных учреждениях, а также недостаточное развитие системы услуг по уходу на дому, условия проживания некомфортны и лишены приватности, функции домов престарелых однообразны [5].

Методы исследования включают анализ научных, литературно-публицистических источников, а также статистических данных (в том числе интернет-ресурсов), освещающих вопросы эволюции архитектурных решений домов престарелых. Также проведено изучение проектно-графических и фотографических материалов, отражающих китайский и зарубежный опыт в области проектирования и строительства ДП.

Научной базой исследования являются: труды Мельникова Ф.Д., Ждановой И.В., Кузнецовой А.А., Михайлиной П.И., Генералова В.П. раскрывающие вопросы развития типологии домов престарелых; исследования Крундышева Б.Л., Минибаева А.М., Денисенко Е.В., Сергеевой Н.В. Чжоу Яньмин, Regnier V., Коротковой

С.Г., Денисовой Я.А., Шавалиевой А.А. в которых рассмотрены принципы и специфика архитектурно-планировочных решений ДП; работы Лю Цин, Ли Сыжуй, Ли Сюэбин посвященные социальным вопросам проектирования ДП; труды Ян Янмэй, Калачаровой А.М., Козловского В. Д. раскрывающие взаимосвязь между дизайном ДП и здоровьем пожилых людей.

Целью данного исследования является выявление ключевых тенденций в архитектурной организации современных домов престарелых.

Основная задача исследования заключается в анализе опыта проектирования и строительства, позволяющего раскрыть архитектурно-планировочные и пространственные решения домов престарелых. Китайский опыт проанализирован на примере домов престарелых в Китае, а зарубежный — на примерах таких стран, как Нидерланды, Япония, США и других.

Объектом исследования являются современные дома престарелых.

Основная часть. Для выявления архитектурно-планировочных и градостроительных особенностей организации ДП был проведен сравнительный анализ китайского и зарубежного опыта. Общие тенденции были систематизированы в три ключевые группы: градостроительные, функционально-планировочные и объемно-пространственные решения.

Зарубежный опыт проектирования и строительства современных домов престарелых.

Одной из значимых тенденций является интеграция домов престарелых в систему городского планирования и развития. ДП размещаются в рамках следующих функционально-планировочных структур: жилая зона, ландшафтно-рекреационная зона [6].

Размещение ДП в структуре города зависит от их типа, от требований к площади участка, к инфраструктуре и пешеходной и транспортной доступности. Изучение опыта показало, что ДП семейного типа, центры дневного ухода и располагаются в жилых зонах; ДП санаторного и специализированного типа и кварталы для престарелых размещаются в рекреационных зонах (табл. 1).

Так, например, дом семейного типа ДП «ParkEntree» (Нидерланды) расположен в жилом квартале, занимает участок площадью 22000 м², благоустройство участка включает общий сад с площадками для проведения различных мероприятий и для ведения огорода. Территория квартала имеет развитую инфраструктуру и включает парк, городской лес, хорошую систему общественного транспорта, большие супермаркеты и т.д.

Центр дневного ухода ДП «Акпо» Аичи (Япония) расположен в жилом районе, занимает

участок площадью 134 м². Вход в здание представляет собой автостоянку и не имеет необходимого благоустройства. Здесь проводятся реабилитационные занятия, осуществляется руководство по уходу, купание, питание и другие услуги для пожилых людей по месту жительства.

Кварталы для престарелых «New Bridge» в Дедхам (США) расположены в живописном месте на берегу реки, в 14 километрах от мегаполиса. Комплекс занимает участок площадью 655000 м². На территории комплекса есть частная школа и общественные учреждения. Из-за размера территории многие пожилые люди приобрели мобильные скутеры, чтобы легче было передвигаться по району.

Важной тенденцией является наличие удобных транспортных коммуникаций и объектов обслуживания (общественный транспорт, супермаркеты, банки, общественные больницы и т.д.). Это удобно для ежедневных поездок пожилых людей и облегчает посещение их родственниками и друзьями. Дом престарелых «Mount San Antonio Gardens Green House» (USA) с отличным транспортным сообщением и развитой инфраструктурой. Расположение здания на территории пансионата позволяет легко организовать дополнительные мероприятия и услуги.

Также в качестве градостроительных решений необходимо отметить расположение ДП в сельской местности. Например, архитектурно-планировочное решение дома престарелых «Орбек» (Франция) расположенного в долине на склоне холма имеет связь с ландшафтом. Здание спроектировано таким образом, чтобы улучшить жилые и прогулочные зоны.

В качестве тенденций функционально-планировочных решений можно отметить многофункциональность, создание односторонних ячеек, включение атриума, создание домашней атмосферы (табл. 2).

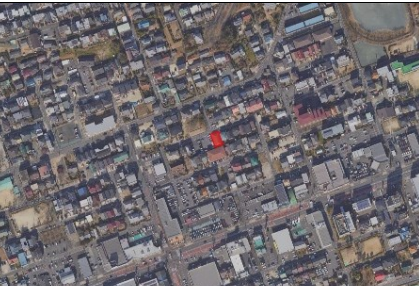
Для современных ДП характерной чертой является многофункциональность. ДП обладает расширенной функциональной структурой, включающей объекты медицинского обслуживания, зоны для досуга и спорта, зоны общественного питания, образовательные пространства, а также многофункциональные рекреационные зоны, предназначенные для обеспечения социального взаимодействия различных групп населения [7]. Например, ДП Waveny для пожилых людей с деменцией находится в Коннектикуте США, имеет пассажную планировочную схему. «Жилая улица» проходит с севера на юг через здание, соединяя два сада с северной и южной сторон. К востоку от «улицы» находится приватное жилое пространство, в котором располагаются жилые ячейки. Вдоль улицы и к западу от нее расположены динамичные пространства для

общественной деятельности с ресторанами, магазинами и местами для проведения мероприятий. В юго-западном углу здания расположены вспомогательные и административные помещения,

соединенные с прилегающим медицинским центром.

Таблица 1

Градостроительные тенденции (зарубежный опыт)

Название объекта. Общий вид		Примечание
Размещение в структуре города		
 		Жилая зона
ДП семейного типа «ParkEntree» (арх: Inbo, Схидам, Нидерланды, 2007 год) https://inbo.com/en/projects/parkentree-schiedam/		
 		Жилая зона
Центр дневного ухода ДП Акпо (Аичи, Япония, 2012 г.) https://www.sanyohomes.co.jp/shisan/example/ds01.html		
 		Рекреационная зона
Кварталы для престарелых типа ДП New Bridge (арх: Студия Перкинса Истмена, Дедхам, США, 2009 год) http://www.bmdec.com/html/nursing/		
Обеспечение транспортной доступности		
 		Доступ к ДП возможен как и на личном автотранспорте, так и на различных видах общественного.
Размещение ДП в сельской местности в живописных местах		
 		ДП размещен живописном месте, с учетом видовых характеристик.
Дом престарелых Орбек (арх: Dominique Coulon и associés, Орбес, Франция, 2015 год) https://www.sohu.com/a/602632057_100051959		

Функционально-планировочные тенденции (зарубежный опыт)

72

В настоящее время наблюдается тенденция создания одноместных жилых ячеек, площадью от 28 до 56 м², которые кроме спальни включают такие помещения как: гостиную, кухню нишу, туалетную комнату, террасу. Одноместные номера отличаются более комфортным проживанием и дают возможность уединения, способствуют улучшению сна и отдыха. Также во время вспышки эпидемий позволяют более эффективно вводить карантин [8].

Так, одноместные жилые ячейки ДП «Rundgraafpark» (Нидерланды), имеют площадь от 74 до 102 м² и включают следующие помещения: кухня, столовая, гостиная, спальня, балкон, туалет, ванная комната.

Атриумы и внутренние дворы становятся все более важными для организации досуга в домах престарелых. Атриумы в общественных пространствах ДП играют особую роль, служат украшением зданий, являются своего рода доминантой, центром комплекса, который становится многофункциональным общественным пространством [9]. Эти пространства могут быть использованы как «зеленая» рекреация, где пожилые люди разводят огороды (садоводческая терапия). Также здесь возможно проведение различных занятий: спорт, танцы, настольные игры, чтение и т.д. Так, в атриуме ДП «Humanitas bergweg» (Нидерланды) организована столовая, а также пространства для проведения различных мероприятий с участием большого количества пожилых людей.

В домах престарелых основное внимание уделяется уходу, а не лечению. Обстановка в доме престарелых должна быть похожей на домашнюю жизнь, а не на больничную. Медицинская функция в зарубежном опыте в основном заключается в приеме у профессиональной медицинской бригады, которая приезжает на дом. Команда медицинской поддержки включает в себя врача, практикующую медсестру, физиотерапевта, рекреационного терапевта, социального работника, диетолога и логопеда. Эти специалисты приезжают в дом престарелых для оказания услуг по заранее составленному графику. График согласовывается куратором вместе с пожилыми людьми. Одна медсестра отвечает за две группы в дневное время и три - в ночное. Такая конфигурация группы позволяет оказывать терапевтические, сестринские и консультационные услуги, необходимые для жизни дома. Однако сложные терапевтические мероприятия все равно требуют посещения больницы (например, операция, МРТ и т. д.) [10].

Дом престарелых «Леонарда Флоренса» (США) расположен в центре города. Это первый городской проект дома с «зелеными» технологиями, рассчитанный на 100 человек на 6 этажах. Со 2 по 5 этажи - жилые помещения, на каждом этаже по 2 жилые группы (по 10 человек в группе), куда можно подняться на 2 лифтах. Всего в здании 10 жилых групп, две из которых предназначены для людей с AMD. Кроме того, есть одна группа для людей с рассеянным склерозом и одна группа для людей с болезнью Паркинсона. Группы независимы друг от друга, что позволяет нанимать специализированный персонал в соответствии с различными потребностями проживающих.

Для объемно-пространственных решений домов престарелых характерно следующее: автономность жилой ячейки, кооперация домов престарелых с медицинскими центрами и жилыми комплексами, индивидуальная особенность жилых ячеек (табл. 3)

Важной тенденцией является автономность жилой ячейки. Независимое разделение на несколько жилых групп позволяет сиделкам более эффективно ухаживать за пожилыми людьми и предоставлять им высококачественные услуги. Облегчает изоляцию и карантин во время вспышек заболеваний. Кроме того, площадь каждой группы имеет небольшой масштаб, а атмосфера в помещении больше похожа на атмосферу собственного дома, что делает проживание пожилых людей более комфортным. Это также позволяет разделить пожилых людей с разным физическим состоянием на разные группы [11]. В этом случае комплекс состоит из независимых жилых ячеек, которые включают в себя общую кухню, столовую, гостиную.

Например, ДП «Айтборхавен» (Дания) состоит из пяти автономных жилых групп, объединённых системой коридоров. Каждый кластер включает девять одноместных жилых помещений, внутренний двор, террасы, общую кухню и столовую, гостиную, прачечную, а также служебные помещения для персонала, включая кабинеты для сиделок. Группы независимы друг от друга, что позволяет нанимать специализированный персонал в соответствии с различными потребностями проживающих.

В планировочных решениях ДП «Опека» (Россия) использована модульная система. Каждый автономный модуль, включающий шесть двухместных жилых номера, комнаты для сиделок, кухню-нишу, сгруппирован вокруг общественного пространства, которое используется в качестве гостиной [12].

Таблица 3

Объемно-пространственные решения (зарубежный опыт)

Название объекта. Общий вид	Примечания
Автономность жилых ячеек  Дом престарелых Айтбьорхавен (арх: Schmidt, Hammer og Lassen, Дания, 2008 год) https://www.arkitekturbilleder.dk/bygning/aertebjerghaven	Функциональный состав: 9 одноместных жилых помещений, внутренний двор, террасы, общую кухню и столовую, гостиную, прачечную, служебные помещения для персонала, кабинеты для сиделок.
 Дом престарелых Опека (арх: AMD, Россия) https://sgc-opesa.ru/spb/news/kakim-dolzhen-byt-sovremennyy-dom-prestarelykh-v-r/	Функциональный состав: -6 двухместных жилых номера, -комнаты для сиделок, -кухню-нишу, -общая гостиная.
Кооперация домов престарелых с медицинскими центрами и жилыми комплексами  Дом престарелых De Plussenburgh (арх: Arons en Gelauff, Нидерланды, 2006 год) https://www.sohu.com/a/459872242_267672	Функциональный состав: -жилая, -досуга, -общественного питания, -медицинская. -дневной уход за пожилыми людьми осуществляется в соседнем доме престарелых.
Индивидуальность жилых ячеек  Жилой комплекс для престарелых ВоЦоКо (арх: MVRDV, Нидерланды, 1997 год) https://archi.ru/projects/world/5926/zhiloi-dom-wozoco	Балконы имеют разное цветовое решение. Цвет ограждения балконов каждый жилец выбирал по собственному вкусу.
 Дом престарелых Сады горы Сан-Антонио (арх: Ewing, Кларемонт, США, 2013 г.) https://msagardens.org/the-green-house-prototype-skilled-nursing-facility-for-the-state-of-california/	жилые ячейки могут быть обставлены собственной мебелью и обустроены в соответствии с предпочтениями пожилых людей

Получает развитие кооперация домов престарелых с медицинскими центрами и жилыми комплексами. Это характерно в странах с высоким уровнем старения, таких как Япония, Нидерланды, Китай. Архитектурно-планировочная среда в таких комплексах позволяет создать домашний уют, но при этом присутствует спектр медицинских услуг, что позволяет оказывать своевременные медицинские услуги проживающим [13]. Так, дом престарелых «De Plussenburgh» (Нидерланды) является частью больничного комплекса.

Индивидуальная особенность жилых ячеек и включение общественных пространств (гостиной, кухни, столовой, комнаты для занятий) способствует созданию «живой» домашней атмосферы, что благоприятно влияет на пожилых людей. Так же важно отметить, что учитываются дизайнерские предпочтения пожилых людей, это может быть выражено в фасадных или интерьерных решениях.

Так, например, в фасадах жилого комплекса для престарелых ВоЦоКо прочитывается индивидуальная особенность квартир. Интересно отметить, что цвет ограждения балконов каждый жилец выбирал по собственному вкусу [14].

Важным фактором, оказывающим влияние на психофизическое состояние и работоспособность пожилых людей и, в особенности, с ограниченными возможностями здоровья, является дизайн интерьера [15]. Идентификация, чувство принадлежности выражено в планировочных решениях дома престарелых «Сады горы Сан-Антонио» в Калифорнии (США). Так одноместные жилые ячейки, сгруппированные вокруг общего многофункционального пространства, могут быть обставлены собственной мебелью и обустроены в соответствии с предпочтениями пожилых людей. В качестве отделки помещений использовано дерево, что создает атмосферу жилого дома.

Китайский опыт проектирования и строительства современных домов престарелых.

Градостроительные решения ДП в Китае имеют схожие тенденции с мировым опытом (табл. 4). Однако в качестве отличительной особенностью стоит отметить развитие услуг по уходу за престарелыми, улучшение безбарьерных систем и формирование планировочных решений с учетом возрастных особенностей. Общественное содержание престарелых - важный способ справиться со старением населения Китая [16]. В "14-м пятилетнем плане", национальном плане по развитию проблемы старения и системы обслуживания пожилых людей, предлагается развивать общинные учреждения по обслуживанию пожилых людей и создавать "15-минутный"

круг обслуживания пожилых людей на дому [17]. Так, в жилых кварталах создаются центры дневного ухода, которые предоставляют широкий спектр услуг для пожилых людей. Также планами развития предусмотрена реконструкция старых учреждений по уходу за пожилыми, активация коммерческих возможностей для диверсификации жилых кварталов т.д. [18].

В качестве примера можно отметить ЦДУ на улице ДашанЛан (Пекин), расположенный среди жилой застройки сообщества. Комплекс расположен в здании бывшего традиционным жилым зданием и имеет площадью 669 м², вместимость от 30 до 40 пожилых людей. ЦДУ включает комнату отдыха, комнату для ухода, комнату реабилитационного обучения, временную жилую комнату, кухню, столовую, общественные ванные, туалеты, офис.

В китайском опыте получает развитие тенденция размещения ДП в сельской местности в живописных местах. Вдали от городской суеты и в непосредственной близости от природы. Это соответствует планам Генеральной канцелярии Госсовета КНР о формировании базовой системы ухода за пожилыми людьми и развития строительства сельских домов престарелых [19]. Это связано с тем, в сельской местности особо острой является проблема семьи «пустое гнездо» [20].

Однако, важно отметить, что в настоящее время в Китае ДП в сельской местности мало, условия проживания и качество услуг плохие. В качестве примера можно отметить дом престарелых Шаншуй (Китай), расположенный вблизи основных сельских дорог. Комплекс включает 4 жилые группы, состоящие из 15 двухместных комнат. Важно отметить отсутствие медицинских кабинетов. Перед каждой группой зданий имеется отдельный внутренний двор.

В функционально-планировочных решениях можно отметить следующие тенденции: многофункциональность, использование атриумных пространств, развитие медицинской функции (табл. 5).

В основном для Китая характерны монофункциональные ДП, но важно отметить, что получают развитие учреждения для престарелых с развитым функциональным составом. Так, с учетом современных требований и национальных традиций комплексы включают помещения для религиозных обрядов, чайных церемоний, помещение для занятий по интересам, помещение для физических занятий, помещение для медицинской реабилитации, помещение для обучения пожилых людей, общая столовая, администрация и т.д.

Таблица 4

Градостроительные тенденции (китайский опыт)

Название объекта. Общий вид	Примечание
"15-минутный" круг обслуживания пожилых людей  Центр дневного ухода на улице Дашан Лан (арх: Архитектурная студия Университета Цинхуа, Пекин, Китай, 2014 год) Фотографии, сделанные автором	В качестве примера можно отметить ЦДУ на улице ДашанЛан (Пекин), расположенный среди жилой застройки сообщества. Комплекс расположен в здании бывшего традиционным жилым зданием
Размещение ДП в сельской местности в живописных местах  Дом престарелых Шанишуй (Чжоукоу, Китай, 2006 год) Фотографии, сделанные автором	ДП расположенный вблизи основных сельских дорог.

Например, в центре дома престарелых «Йо Кью 100» (Китай) находится большой открытый двор с площадкой для занятий, детской игровой зоной, павильоном и искусственным прудом. На возвышенной части первого этажа северной части здания находится полуоткрытая фитнес-зона со столами для настольного тенниса, тренажерами, столами и стульями. На первом этаже здания с северной стороны расположен бассейн. На первом этаже здания с западной стороны находится общественная развлекательная и медицинская зона, включающая многофункциональный зал, комнату для игры в шахматы и карты, танцевальный зал, читальный зал, комнату для рисования и каллиграфии, чайную комнату и т.д.

В отличие от зарубежного опыта, в Китае, из-за позднего развития домов престарелых, большинство жилых ячеек представляют собой двухместные, трехместные или четырехместные номера. Жилые комнаты площадью от 18 до 32 м², как правило, включают только спальню и туалет. Это проблема, которую необходимо решить в китайских домах престарелых.

Для функционально-планировочных решений ДП характерно наличие атриума, который используется для проведения различных мероприятий. Например, ДП «Юйюань» (Китай) бывшее офисное здание, которое переделали в дом престарелых. В связи с плохим внутренним

освещением, в центральной части здания сделали атриум, а вокруг него организовали общественные пространства. Наличие атриума улучшило освещение в общественном пространстве, а также дало возможность создать для пожилых людей комфортные места для отдыха и общения.

Особенностью китайского опыта является наличие развитой медицинской функции и включают такие помещения как: консультационный кабинет, лаборатория, капельница, физиотерапевтический кабинет, кабинет ЭКГ, аптека, кабинет психологического консультирования, реабилитационный кабинет и т.д. Большинство из этих функций расположены на первом или втором этаже. В жилых ячейках также организованы станция медсестер, чтобы повысить эффективность работы сиделок и обеспечить уход за пожилыми людьми в кратчайшие сроки. Также эти медицинские функции иногда выполняют жители и пожилые люди в близлежащих районах, удовлетворяя их потребности в реабилитационном обучении, мониторинге здоровья и т.д. [21].

Например, домах престарелых «Тайичун» (Китай), Проект расположен в центре Лояна. Медицинские функции расположены на первом этаже здания, и попасть в медицинскую зону можно через прихожую. Медицинская зона отделена от зоны отдыха и жилой зоны, чтобы не со-

здавать в доме престарелых обстановку, похожую на больничную. Медицинская зона включает в себя реабилитационную комнату, консуль-

тационный кабинет, комнату отдыха для пациентов, инъекционный кабинет, аптеку и кабинет врача.

Таблица 5

Функционально-планировочные тенденции (китайский опыт)

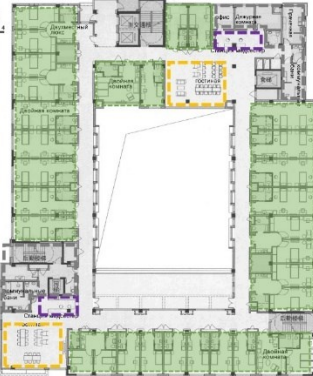
Название объекта. Общий вид	Примечание
Многофункциональность  Жилые Отдых и Развлечения Продукты Кухня и Столовая Медицина Вспомогательные помещения Дом престарелых Йо Кью 100 (арх: Студия Чжоу Янмин, Чжэнчжоу, Китай, 2015 г.) Фотографии, сделанные автором	Функциональный состав: -жилая, -досуговая, -спортивная, -общественного питания, -медицинская, -административная зоны, -внутренний двор
Использование атриумного пространства  Жилые Отдых и Развлечения Медицина Вспомогательные помещения Дом престарелых Ванькэ Юйюань (арх: Студия Тяньхуа, Тяньцзинь, Китай, 2018 г.) https://www.archdaily.com/914158/yiyuan-service-centre-for-the-elderly-shanghai-tianhua-architectural-design-star-beijing-branch?ad_medium=gallery	Функция атриума – Зал, чайная зона Мероприятия: -отдых, -социальное общение, -организация мероприятий
Развитая медицинская функция  Жилые Отдых и Развлечения Вспомогательные помещения Кухня и Столовая Медицина Дом престарелых Тайичун (арх: Студия Чжоу Янмин, Лоян, Китай, 2016 г.). Изображение из книги «Архитектура для учреждений для пожилых людей. Детали конструкции 2»	Медицинская зона: -медицинский кабинет, -реабилитационная комната, -аптека, -физиотерапевтический кабинет, -электрокардиограмма, -психологической консультации, -химическая лаборатория.

К особенностям объемно-пространственных решений можно отнести: атриумную объемно-пространственную схему, кооперацию ДП с медицинскими учреждениями, создание Домашняя

атмосфера и идентичности пространства (табл. 6).

Таблица 6

Объемно-пространственные тенденции (китайский опыт)

Название объекта. Общий вид	Примечание
Атриумная планировочная схема   Жилые Отдых и Развлечения Медицина Вспомогательные помещения Дом престарелых Тайичун (арх: Студия Чжоу Янмин, Лоян, Китай, 2016 г.) Изображение из книги «Архитектура для учреждений для пожилых людей Детали конструкции 2»	Функция атриума – Зал, кафе, чайная комната, Мероприятия: -отдых, -социальное общение, -питание, -организация мероприятий
Кооперация ДП с медицинскими учреждениями   Дом престарелых Чжоуцзяду (Шанхай, Китай, 2020 год) https://hcd.zhuyitai.com/journals/hcd/article/364e3b362f04493ba975c479bd093546	В состав комплекса входит больница, дом престарелых и центр досуга для пожилых людей
Домашняя атмосфера и идентичность пространства   Жилые Отдых и Развлечения Кухня и Столовая Медицина Вспомогательные помещения Дом престарелых Тайичун (арх: Студия Чжоу Янмин, Лоян, Китай, 2016 г.) Изображение из книги «Архитектура для учреждений для пожилых людей Детали конструкции 2»	Мебель, растения и элементы декора в жилых ячейках и общественных пространствах могут быть размещены по усмотрению пожилых людей.

Для традиционной китайской архитектуры характерно использование атриумной планировочной схемы, как правило, это небольшие внутренние дворы с ландшафтным дизайном [22]. С развитием современной архитектуры пространство атриума обычно имеет больший пространственный масштаб, а его атрибуты ориентированы на открытое общественное пространство.

Однако для пожилых людей, которым необходимо отдыхать и восстанавливать силы, большое атриумное пространство не подходит для длительного пребывания в нем [23]. В атриуме предусматривают организацию различных функций: ресторана, кафе, зимнего садом, библиотеки.

Дом престарелых «Тайичун» (Китай) имеет атриумную структуру. Большой внутренний двор в центре здания обеспечивает достаточное освещение и хорошую вентиляцию внутренних помещений. Сад на открытом воздухе является местом для отдыха пожилых людей.

В настоящее время правительство Китая активно пропагандирует политику «совмещения медицинского обслуживания и ухода за пожилыми людьми», и кооперация домов престарелых с медицинскими учреждениями стала тенденцией. В качестве примера можно отметить экспериментальный проект комплекса (Шанхай), в состав которого входит больница, дом престарелых и центр досуга для пожилых людей [24].

Тенденция формирования домашней атмосферы и идентичности пространства характерна и для китайского опыта. Например, в ДП «Тайичун» общественные пространства жилых групп выполняют функцию столовой, а также служат местом для общения и отдыха. Мебель, растения и элементы декора могут быть размещены по усмотрению самих пожилых жителей, что способствует созданию индивидуальной и комфортной среды.

Выводы. Анализ и обобщение китайского и зарубежного опыта позволили выявить ключевые тенденции в развитии архитектурных решений современных ДП.

Согласно национальным планам развития в Китае планируется создание системы повседневного обслуживания пожилых людей, включение ДП в жилые и рекреационные зоны города. Важной тенденцией является проектирование и строительство учреждений по уходу за пожилыми в сельской местности.

Распространенной тенденцией является кооперация ДП с медицинскими центрами, это позволит повысить уровень медицинского обслуживания в домах престарелых, облегчить доступ пожилых людей к медицинской помощи и повысить эффективность работы врачей.

Получают развитие многофункциональные ДП, в состав которых входят жилые ячейки различных типов, помещения для медицинских кабинетов и реабилитации, пространства для занятий спортом, кружковые различного назначения (шахматы, танцы), также есть зоны для проведения религиозных мероприятий.

Применение атриумной схемы в функционально-планировочных решениях ДП является наиболее целесообразным, что позволяет оптимизировать коммуникационные связи. Это особенно важно, как для удобства пожилых людей, так и для эффективности работы обслуживающего персонала.

Особое внимание уделяется формированию жилых ячеек. Современные жилые ячейки проектируют автономными, одностанными, в состав которых входит спальня, гостиная, кухня ниша, санитарный узел. Индивидуальная особенность жилых ячеек и включение общественных пространств способствует созданию «живой» домашней атмосферы, что благоприятно влияет на пожилых людей.

Общественные пространства являются неотъемлемой частью современных ДП и играют важную роль в организации досуга и качестве жизни пожилых людей. Так ДП включают открытые (сады, огороды, площадки) и закрытые (атриумы, коридоры, общие гостиные и общие кухни, комнаты для занятий) пространства.

К проблемам проектирования и строительства домов престарелых в Китае следует отнести: неравномерное распределение ДП между городской и сельской местностью; монофункциональность; типовые планировочные решения; отсутствие домашней атмосферы в архитектурных решениях, наличие преимущественно трех и четырехместных жилых ячеек.

Однако, согласно планам развития, представляется, что в Китае есть потенциал для проектирования и строительства ДП, соответствующих современным архитектурным, санитарным требованиям и потребностям пожилых людей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИ СПИСОК

1. Хулиен Л. Развитие старения населения. Режим доступа: URL: <http://www.21bcr.com/shijiezhongguorenkoulaolinguafazhantaishi/> (дата обращения: 18.12.2023).
2. Вердербер С., Файн Д. Архитектура здравоохранения в эпоху радикальных преобразований // Journal of the Society of Architectural Historians 2000. No. 4. С. 556–557. DOI:10.2307/991638
3. Кане Р., Вест Й. Так не должно быть: Провал системы долгосрочного ухода // Издательство Университета Вандербильта, Нэшвилл. 2005. 180 с.
4. Планирование строительства системы социального обслуживания пожилых людей (2011–2015 гг.). URL: https://www.gov.cn/gongbao/content/2012/content_2034729.htm (дата обращения: 02.10.2024).
5. Ихун Ч., Цянь Н. Предложение, спрос и структура: логика построения китайской системы социального обслуживания пожилых людей: эмпирические данные на основе учреждений для пожилых людей в шести городах. URL: <http://sociologyol.ruc.edu.cn/shxyj/fzshx/rkx/15aec0e81c3040efac71e4afb74c21fc.htm> (дата обращения: 02.10.2024).

6. Крундышев Б.Л. Архитектурное проектирование комплексных центров социального обслуживания людей старшей возрастной группы. учебное пособие. Санкт-Петербург: SPbGASU. 2011. 110 с.
7. Жданова И.В., Кузнецова А.А., Михайлина П.И. Выявление особенностей архитектурной типологии домов престарелых // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2020. №7. С. 33–39
8. Мангили С., Сан Т., Джонсон А.А. Дома престарелых во время пандемии COVID-19 — систематический обзор литературы по стратегиям проектирования архитектуры, защищающей от COVID-19. // Технологическое воображение в зеленом и цифровом переходе. CONF.ITECH 2022. 2023. С. 981–990.
9. Пименова Е.В. Особенности формирования общественных пространств в структуре зданий образовательных организаций // ИВД. 2016. №3 (42). С. 84–93. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-obschestvennyh-prostranstv-v-strukture-zdaniy-obrazovatelnyh-organizatsiy>(дата обращения: 17.08.2024).
10. Томас У. Для чего нужны пожилые люди? М.: VanderWyk and Burnham, 2007. 370 с.
11. Ренье В. Проектирование жилья для все более стареющего населения – переосмысление вспомогательного проживания для умственно и физически слабых // CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS, 2019. 288 с.
12. Современный пансионат для пожилых людей Парк Отель Опека. Режим доступа: URL: <https://sgc-opesa.ru/o-kompanii/investitsionnyy-proekt/> (дата обращения: 19.12.2023).
13. Минибаева А.М., Денисенко Е.В. Предпосылки и тенденции развития архитектуры домов для пожилых людей в отечественном и зарубежном опыте проектирования // Известия КГАСУ. 2019. № 2 (48). С. 64–72.
14. Рябушин А. Архитекторы рубежа тысячелетий. Книга вторая. Поиски и открытия. М.: Искусство - XXI век. 2014. 416 с.
15. Калачарова А.М., Козловский В.Д. Дизайн интерьеров центра социальной адаптации для людей с ментальными нарушениями: социокультурный аспект // Культура: теория и практика. 2017. №4 (19). С. 99–108.
16. Сюэбин Л. Обзор исследований в области услуг по уходу за пожилыми людьми на базе общин в Китае // Социальные науки Нинся. 2008. С. 42–46.
17. «Четырнадцатый пятилетний план» по развитию Национальной программы старения и системы обслуживания пожилых людей. 2022. Режим доступа: URL: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/21/content_5674844.htm(дата обращения: 19.12.2023).
18. Яньмин Ч. Архитектура для учреждений для пожилых людей Детали конструкции 1. М.: Китайская пресса строительной индустрии, 2018. 218 с.
19. Цин Л. Ускорение базового обслуживания пожилых людей в сельских районах. газета Гуанмин Дейли. 2023. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <http://dangjian.people.com.cn/n1/2023/0728/c117092-40045592.html>(дата обращения: 19.12.2023).
20. Сыжуй Л. Семья в Состоянии «ПУСТОГО ГНЕЗДА» // Вестник ТОГУ. 2017. С. 211–221.
21. Ян Яньмэй. Исследование стратегии архитектурного дизайна медицинских и уходовых комбинированных объектов для пожилых людей // Юго-Западный университет Цзяотун, 2015. 84 с.
22. Бин Ч. Потенциальная связь между современными архитектурными пространствами и традиционными китайскими дворами и садами // Шанхай Университет Тунцзи, 2006. 75 с. DOI:10.7666/d. y859262.
23. Цзин В., Жунтин Л., Чжэньхуэй Ч. Адаптивное к климату проектирование высоких атриумов в общественных зданиях в круглогодичном жарком климате: исследование библиотеки Гуанчжоу. Университет Синьхуа // Южная архитектура. 2023. №11. С. 60–69.
24. Интеграционное проектирование зданий для медицинских учреждений и учреждений для пожилых людей на основе конкретного опыта. Режим доступа: URL: <https://hcd.zhuyitai.com/journals/hcd/article/364e3b362f04493ba975c479bd093546>(дата обращения: 19.12.2023).

Информация об авторах

Ли Яньбо, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: 525046210@qq.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 01.10.2024 г.

© Ли Яньбо, 2025

Li Yanbo

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: 525046210@qq.com

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL AND SPATIAL SOLUTIONS OF NURSING HOMES

Abstract. *The research of modern nursing homes is becoming increasingly relevant against the background of the accelerating process of population aging, as well as changing social and economic conditions. It is important to emphasize that understanding the trends in the development of such institutions is of key importance for the typological analysis of their architectural solutions. This makes it possible not only to adapt nursing homes to the modern needs of the elderly, but also to improve their functionality and comfort. In this regard, it is particularly important to identify the main directions and trends in the development of modern nursing homes.*

The purpose of this study is to identify the main trends in the architectural organization of modern nursing homes. To achieve this goal, a comprehensive analysis of Chinese and foreign experience of nursing homes was carried out.

The research methods include: the study of scientific, literary and journalistic sources, Internet resources devoted to the development of nursing home architecture; the analysis of design and graphic and photographic materials illustrating the practice of nursing home design and construction in China and abroad.

The results of the study revealed key trends in the development of urban planning, functional-planning and volumetric-spatial solutions for nursing homes. The most important and widespread trends include the development of elderly care services, improvement of barrier-free systems, multifunctionality, formation of public spaces for leisure activities of the elderly, autonomy of residential units, cooperation of nursing homes with medical centers.

Keywords: *nursing homes, Chinese and foreign experience, development trends, urban planning solutions, functional-planning solutions, volume-spatial solutions.*

REFERENCES

1. Hulin L. Development of population aging [Razvitiye stareniya naseleniya]. URL: <http://www.21bcr.com/shijiezhongguorenkou-laolinghuafazhantaishi/> (date accessed: 18.12.2023). (rus)
2. Verderber S., Fajn D. Healthcare Architecture in an Era of Radical Transformation [Arhitektura zdravoohraneniya v epohu radikal'nyh preobrazovaniy]. Yale University Press, New Haven, CT. 2000. Pp. 556–557(rus)
3. Kane R., West J. It Shouldn't Be This Way: The Failure of Long-Term Care [Tak ne dolzhno byt': Proval sistemy dolgosrochnogo uhoda]. Vanderbilt University Press, Nashville. 2005. 180 p. (rus)
4. Social Elderly Service System Construction Plan (2011-2015) [Planirovanie stroitel'stva sistemy social'nogo obsluzhivaniya pozhilyh lyudej (2011-2015)]. URL: https://www.gov.cn/gongbao/content/2012/content_2034729.htm (date accessed: 02.10.2024). (rus)
5. Yihong Z., Qian N. Supply, Demand and Structure: The Logic of Constructing China's Social Elderly Service System: Empirical Evidence Based on Elderly Institutions in Six Cities [Predlozhenie, spros i struktura: logika postroeniya kitajskoj sistemy social'nogo obsluzhivaniya pozhilyh lyudej: empiricheskie dannye na osnove uchrezhdenij dlya pozhilyh lyudej v shesti gorodah]. URL: <http://sociologyol.ruc.edu.cn/shxyj/fzshx/rkx/15aec0e81c3040efac71e4afb74c21fc.htm> (date accessed: 02.10.2024). (rus)
6. Krundyshev B.L. Architectural design of complex social service centers for people of older age group [Arhitekturnoe proektirovanie kompleksnyh centrov social'nogo obsluzhivaniya lyudej starshej vozrastnoj gruppy. uchebnoe posobie]. Textbook. St. Petersburg: SPbGASU. 2011. 110 p. (rus)
7. Zhdanova I.V., Kuznetsova A.A., Mikhaylina P.I. Identification of features of the architectural typology of nursing homes [Vyyavlenie osobennostej arhitekturnoj tipologii domov prestarelyh]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. №7. Pp. 33–39. (rus)
8. Silvia Mangili, Tianzhi Sun, and Alexander Achille Johnson. Nursing Homes During COVID-19 Pandemic—A Systematic Literature Review for COVID-19 Proof Architecture Design Strategies [Doma prestarelyh vo vremya pandemii COVID-19-sistematicheskij obzor literatury po strategiyam proektirovaniya arhitektury, zashchishchayushchej ot COVID-19]. Technological Imagination in the Green and Digital Transition. CONF.ITECH 2022. 2023. Pp. 981–990. (rus)

9. Pimenova E.V. Features of the formation of public spaces in the structure of buildings of educational organizations [Osobennosti formirovaniya obshchestvennykh prostranstv v strukture zdaniy obrazovatel'nykh organizatsiy]. IVD. 2016. No. 3 (42). Pp. 84-93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-obshchestvennykh-prostranstv-v-strukture-zdaniy-obrazovatelnykh-organizatsiy>(date accessed: 18.12.2023). (rus)
10. Thomas W. What Are Older People For? [Dlya chego nuzhny pozhilye lyudi?]. M.: VanderWyk and Burnham, 2007. 370 p. (rus)
11. Regnier V. Housing Design for an Increasingly Older Population – Redefining Assisted Living for the Mentally and Physically Frail [Proektirovanie zhilya dlya vse bolee stareyushchego naseleniya – pereosmyslenie vspomogatel'nogo prozhivaniya dlya umstvenno i fizicheski slabyyh]. CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS, 2019. 288 p. (rus)
12. Modern boarding house for the elderly Park Hotel Opeka [Sovremennyy pansionat dlya pozhilykh lyudej Park Otel' Opeka]. URL: <https://sgc-opeka.ru/o-kompanii/investitsionnyy-proekt/> (date accessed: 18.12.2023). (rus)
13. Minibaeva A. M., Denisenko E. V. Prerequisites and trends in the development of architecture of houses for the elderly in domestic and foreign design experience [Predposylki i tendencii razvitiya arhitektury domov dlya pozhilykh lyudej v otechestvennom i zarubezhnom opyte proektirovaniya]. News of KGASU. 2019. No. 2 (48). Pp. 64–72. (rus)
14. Ryabushin A. Architects of the turn of the millennium. Book two. Searches and discoveries [Arhitektory rubezha tysyacheletij. Kniga vtoraya. Poiski i otkrytiya]. Art - XXI century. 2014. 416 p. (rus)
15. Kalacharova A.M., Kozlovsky V.D. Interior design of the social adaptation center for people with mental disabilities: socio-cultural aspect [Dizajn inter'eroev centra social'noj adaptatsii dlya lyudej s mental'nymi narusheniyami: sociokul'turnyj aspekt]. Culture: Theory and Practice. 2017. No. 4 (19). Pp. 99–108. (rus)
16. Xuebing L. A Review of Research on Community-Based Elderly Care Services in China [Obzor issledovaniy v oblasti uslug po uhodu za pozhilymi lyud'mi na baze obshchin v Kitae]. Ningxia Social Science, 2008. Pp. 42–46. (rus)
17. «The Fourteenth Five-Year Plan » for the Development of the National Aging Program and the Elderly Service System. 2022. [«CHetyrnadcatyj pyatiletnij plan» po razvitiyu Nacional'noj programmy stareniya i sistemy obsluzhivaniya pozhilykh lyudej 2022]. URL: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/21/content_5674844.htm (date accessed: 18.12.2023). (rus)
18. Yanmin Z. Architecture for Institutions for the Elderly Structural Details 1 [Arhitektura dlya uchrezhdenij dlya pozhilykh lyudej Detali konstrukcii 1]. M.: China Construction Industry Press, 2018. 218 p. (rus)
19. Qing L. Accelerating Basic Services for the Elderly in Rural Areas [Uskorenie bazovogo obsluzhivaniya pozhilykh lyudej v sel'skih rajonah]. Guangming Daily. 2023. URL: <http://dangjian.people.com.cn/n1/2023/0728/c117092-40045592.html> (date accessed: 18.12.2023). (rus)
20. Sirui L. Family in the State of «EMPTY NEST» [Sem'ya v Sostoyanii «PUSTOGO GNEZDA»]. Vestnik TOGU. 2017. Pp. 211–221. (rus)
21. Yanmei Y. Research on Architectural Design Strategy of Medical and Nursing Combined Facilities for the Elderly [Issledovanie strategii arhitekturnogo dizajna medicinskih i uhodovykh kombinirovannykh ob"ektov dlya pozhilykh lyudej]. Southwest Jiaotong University, 2015. 84 p. (rus)
22. Bing C. Potential Relationships between Modern Architectural Spaces and Traditional Chinese Courtyards and Gardens [Potencial'naya svyaz' mezhdru sovremennymi arhitekturnymi prostranstvami i tradicionnymi kitajskimi dvorami i sadami]. Shanghai: Tongji University, 2006. 75 p. DOI:10.7666/d.y859262. (rus)
23. Czzin V., Zhuntin L., Chzhe'n`xue`j Ch. Climate Adaptive Design of Tall Atriums in Public Buildings in Year-Round Hot Climates: A Case Study of the Library of Guangzhou [Adaptivnoe k klimatu proektirovanie vysokikh atriumov v obshchestvennykh zdaniyah v kruglogodichnom zharkom klimate: issledovanie biblioteki Guanchzhou. Universitet Sin'hua]. Xinhua University. South Architecture. 2023. No. 11. Pp. 60–69. (rus)
24. Integrated design of buildings for medical institutions and institutions for the elderly based on specific experience [Integracionnoe proektirovanie zdaniy dlya medicinskih uchrezhdenij i uchrezhdenij dlya pozhilykh lyudej na osnove konkretnogo opyta]. URL: <https://hcd.zhuyitai.com/journals/hcd/article/364e3b362f04493ba975c479bd093546>(date accessed: 18.12.2023). (rus)

Information about the authors

Li Yanbo, postgraduate student of the Department of Architectural Design. E-mail: 525046210@qq.com St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 4, 2nd Red Army Street, St. Petersburg, 190005, Russia.

Received 01.10.2024

Для цитирования:

Ли Яньбо Тенденции развития архитектурно-пространственных решений домов престарелых // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 69–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-69-83

For citation:

Li Yanbo Trends in the development of architectural and spatial solutions of nursing homes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 69–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-69-83

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-84-95

Тонких В.Д., Перов Ф.В.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: vyacheslav.tonkikh95@yandex.ru,*

ПЛАНИРОВОЧНАЯ СТРУКТУРА КОВОРКИНГ-ЦЕНТРОВ

Аннотация. В статье описан коворкинг как современная форма рабочих пространств для коллективной деятельности. Определены объект, предмет и методы исследования, на основе которых была выполнена данная работа. Объектами исследования стали коворкинг-центры, спроектированные и построенные как в России, так и за рубежом. Предметом исследования являются особенности архитектурно-планировочной структуры коворкинг-центров. Проведен анализ отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства коворкинг-центров, проанализированы их архитектурно-планировочные структуры, выявлены группы помещений, функциональные зоны и функциональные блоки и их характеристики (вместительность), отражающие архитектурно-планировочную структуру коворкинг-центров. Проанализированы существующие понятия коворкингов: в виду их количества и разнообразия, данное понятие разделено на коворкинг как вид совместной деятельности и на коворкинг-центр – объект, где эта деятельность в первую очередь происходит. На основе определений и анализа опыта проектирования, приведено авторское понятие коворкинг-центра как типа объекта. На основе исследований функциональных блоков и зон в коворкинг-центрах предложена иерархия их формы по уровню развития планировочной структуры: коворкинг-площадки, коворкинг-пространство, коворкинг-центр, коворкинг-парк. Сделаны выводы о возможном продолжении исследования и построении типологии объектов совместной деятельности.

Ключевые слова: коворкинг, коворкинг-пространство, планировочная структура, коворкинг-центр, коворкинг-парк.

Введение. На протяжении многих лет люди работали как совместно, так и индивидуально, в различных местах приложения труда. Места для работы постоянно подвергались трансформациям и изменениям, поскольку менялись основные потребности и запросы общества. Так, места для работы развивались, становились то крупнее, то мельче, усложнялись или становились более универсальными.

На рубеже XX-XXI веков сформировалось новое явление, которое получило название «Коворкинг». Если рассмотреть морфологию слова «Coworking», то можно определить его как «Co + working = collaborative + working» - совместная работа. Данный термин первоначально подразумевал следующее: использование офиса или другой рабочей среды людьми, которые работают не по найму или работают на разных работодателей, как правило, для обмена оборудованием, идеями и знаниями [1]. Соответственно коворкинг-центр - это объект, специально предназначенный для подобной деятельности.

Углубившись в историю, то можно разглядеть исторические предпосылки, приведшие к появлению коворкинг-центров: увеличение роли креативного класса, для которого свойственен поиск трансформируемых пространств, а также общее увеличение стоимости аренды рабочих площадей в связи с процессом джентрификации. Эти моменты привели к появлению спроса на новые места для работы, несшие первоначально в

себе концепцию объединения рабочего офиса и дома, совмещая плюсы обоих.

Начиная с 2005 года, они стали появляться сначала единично, локально, и привязывались к научно-образовательным, в первую очередь, структурам – университетам в Кремниевой Долине, г. Сан-Франциско. В течение некоторого времени коворкинг как движение и индустрия был неправильно понят, неизвестен или на него мало внимания обращали просто потому, что подход коворкинг-центров к своим рабочим местам не соответствовал традиционной системе, которая действовала десятилетиями.

Впоследствии, когда предприниматели увидели первые результаты и возможные перспективы в развитии данных типов пространств для работы, число коворкинг-центров резко стало расти. Они приняли множество форм: пространства называются творческими центрами, творческими пространствами, пространствами для совместного творчества, творческими мастерскими, городскими лабораториями, исследовательскими лабораториями или гибкими рабочими пространствами. Помимо этого, в этот список вошли различного вида офисные пространства, офисно-деловые зоны для индивидуальных предпринимателей и фрилансеров, образовательные центры, центры досуга и другие. Как правило, коворкинг-центр является частью пространства других, более крупных объектов и встраивается в их структуру. Таковыми объектами могут быть жилые, промышленные и общественные здания.

Данное направление развивается сейчас крайне активно: к 2024 году по всему миру открыто уже около 40.000 коворкинг-центров различных направленностей. Однако в силу их стихийного, эволюционного (то есть в том числе с сохранением черт, которые не требуются самому объекту для существования, но сохраняются в силу привычки) зарождения, развитие этих объектов хаотично и непоследовательно. Потребность в их классификации и типологизации являются основой важности данной работы, поскольку на настоящий момент не существует четких критериев по качественному и количественному составу помещений и функциональных блоков в коворкинг-центрах, отсутствует система архитектурно-планировочной структуры коворкинг-центров. В равной степени нет и полного понимания, чем они являются.

Коворкинг рассматривался в работах по различным областям знаний: экономические науки [2, 3, 4], педагогические науки [5, 6], социологические науки [7]. В каждой из этих работ коворкинг рассматривался по-своему, соотносясь с основным объектом исследования. В данном же исследовании изучается архитектурно-планировочная структура и её особенности, что ранее не подвергалось достаточному анализу: классификация коворкингов неизвестна, отсутствуют варианты предложения по их типологии и рекомендации по архитектурно-планировочной организации. Это показывает актуальность выбранной темы.

Цель данной работы — расширить понимание темы коворкинга для построения типологии данных объектов. Объектом исследования в рамках данной работы выступают коворкинг-центры и их планировочная структура. Предметом исследования являются особенности архитектурно-планировочной структуры коворкинг-центров. В задачи работы входит:

- дать чёткое определение коворкинга и коворкинг-центра;
- выявить особенности архитектурно-планировочной структуры коворкинга;
- составить схему развития планировочной структуры.

Материалы и методы. При осуществлении исследования были применены следующие методы:

- изучение, сравнительный анализ, систематизация и обобщение графических источников и фотографических материалов (в т.ч. Интернет-источников), отображающие отечественную и зарубежную практику проектирования и строительства коворкинг-центров;

- изучение, сравнительный анализ, систематизация и обобщение публицистических источников.

В основе исследования лежат опыт проектирования коворкинг-центров и научные статьи и диссертации, посвященные их изучению и организации.

Основная часть. Существует большое количество определений коворкинга. Они все отличные друг от друга, и в то же время очень похожи. Понятия характеризуют коворкинг как вид деятельности, как модель работы или как пространство, но не раскрывают его суть как тип объекта. Некоторые из них приведены в таблице 1.

В виду такого многообразия возможных классифицирующих признаков в рамках данной работы было принято решение разделить определения на:

- коворкинг – вид и способ организации деятельности, осуществляемой совместно для обмена опытом и знаниями для достижения коллективного результата;
- коворкинг-центр – это тип объекта, предназначенного для небольших групп сотрудников разной занятости, которые могут свободно менять место для работы для ведения индивидуальной или совместной деятельности. Коворкинг-центр включает в себя несколько функциональных блоков с различным набором помещений и зон, необходимых для той или иной специфики рабочего процесса. Поскольку данная работа имеет в первую очередь цель выявить закономерности и типологизировать рабочие пространства и способы их размещения, будет использоваться именно второе определение.

Чтобы понять особенности архитектурно-планировочной структуры коворкинг-центров, необходимо провести анализ существующих объектов.

Краткий анализ опыта проектирования существующих коворкинг-центров представлен в таблице 2.

В планировках данных проектов можно отметить, что в большинстве из них наличествует общее рабочее пространство, закрытые отдельные помещения для индивидуальной и совместной работы, пространства для проведения мероприятий и переговоров, а также обеденные и рекреационные зоны.

Исходя из анализа опыта проектирования, можно сделать заключение, что коворкинг-центр – это объект, состоящий из общего рабочего пространства для нескольких небольших групп работников и блоков дополнительных и

вспомогательных помещений, отвечающих по своему составу специфике коворкинг-центра.

Основное пространство коворкинг-центров представлено, как правило, в виде большого открытого помещения «open space». Данное пространство характеризуется гибкой структурой и обладает возможностью трансформироваться под разные потребности рабочего процесса и мероприятия. Выделяемые зоны (функциональные

единицы), формирующие его, являются площадками для коллективной работы - коворкинг-площадками.

В зависимости от специализации, величины спектра дополнительных функций и функциональных блоков, коворкинг-центры можно классифицировать по уровням развития архитектурно-планировочной структуры на коворкинг-пространство, коворкинг-центр и коворкинг-парк.

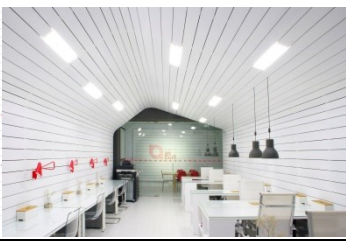
Таблица 1

Определения коворкинга

№ п/п	Термин	Источник
1	Коворкинг – это новый подход к работе, ставящий человека в центр ее. Это не только опыт, но и деятельность, которая происходит в четырех стенах или даже виртуально.	Pauline Roussel. «Around the world in 250 coworking spaces»
2	Коворкинг – модель работы, в которой участники, оставаясь независимыми и свободными, используют общее пространство для своей деятельности. [8]	Савилова С.Д. Диссертация «Новейшая иноязычная лексика в русском студенческом социолекте XXI века»
3	«Коворкинг – это модель работы, в которой участники, не являясь сотрудниками в рамках одной структуры, проекта и иной формы организации, используют общее пространство для своей, преимущественно, индивидуальной деятельности». [9]	Гнеденко Е.П. «Продвижение городских креативных пространств в социальных медиа»
4	Коворкинг – «отличный "start up" для начинающих бизнесменов, а также прекрасный выбор для развивающихся и уже развитых предприятий. Коворкинг представляет собой что-то среднее между эксплуатацией частного офиса и работой на дому». [10]	Ягодкина П.А. «Что есть коворкинг? Преимущества и недостатки»
5	«Коворкинг – пространства, представляющие собой сублимированный вариант рабочего места на дому и в офисе: площадки свободного доступа на базе гибкой аренды, состоящие из полностью оборудованных типовых рабочих мест». [11]	Фьерару В. А. «Общественные и коворкинг-пространства: взаимосвязь и роль в пространственном развитии Санкт-Петербурга»
6	Коворкинг – это подход к организации труда людей с разной занятостью в общем пространстве; в узком - подобное пространство, коллективный офис. [12]	Артюхин Я. Н. «Коворкинг» как пример акмеологической среды»

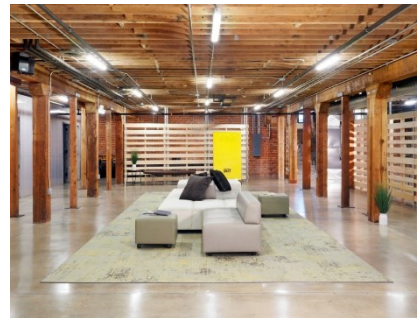
Таблица 2

Анализ опыта проектирования коворкинг-центров

Объекты. Функциональные блоки, помещения, зоны и их характеристики	
Коворкинг-пространства	
Коворкинг-пространство и офис для архитектурной студии, г. Ферроль, Испания [13] Архитектор: As – Built, 2014 г.	
  	
Коворкинг-пространство – 30 м ² , 11 чел. Переговорные – 15 м ² , 8 чел. Рекреация – 10 м ² , 2 чел. Обеденная зона – 5 м ²	

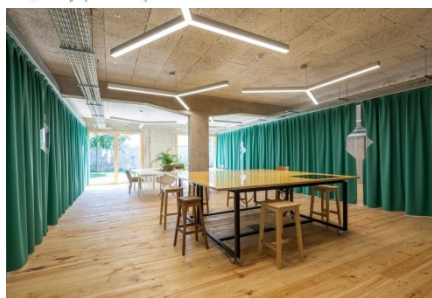
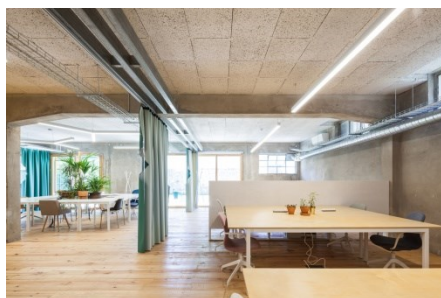
Коворкинг-центры

T Square, г. Каспер, США [14]
Архитектор: Stateline No. 7 Architects, 2019 г.



Коворкинг-пространство – 280 м², 25 чел. Офисы на 1 человека – 10 м², 1 чел.
 Коллективный офис – 35 м², 4 чел. Переговорные – 30 м², 10 чел. Рекреация – 70 м², 10 чел.
 Обеденная зона – 10 м²

Armazem Cowork, г. Порту, Испания [15]
Архитектор: oitoo, 2018 г.



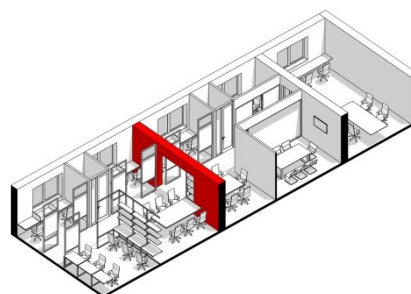
Коворкинг-пространство – 250 м², 45 чел. Коллективный офис – 30 м², 8 чел. Рекреация – 170 м².
 Переговорные – 10 м², 8 чел., Конференц-зал – 40 м², 25 чел. Обеденная зона – 15 м², 8 чел.

Hello Monday, г. Сондон-гу, Южная Корея [16]
Архитектор: Bananafish, 2022 г.



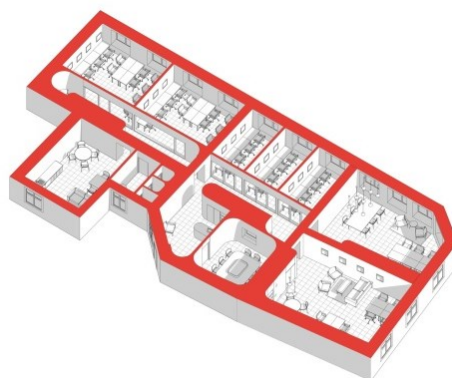
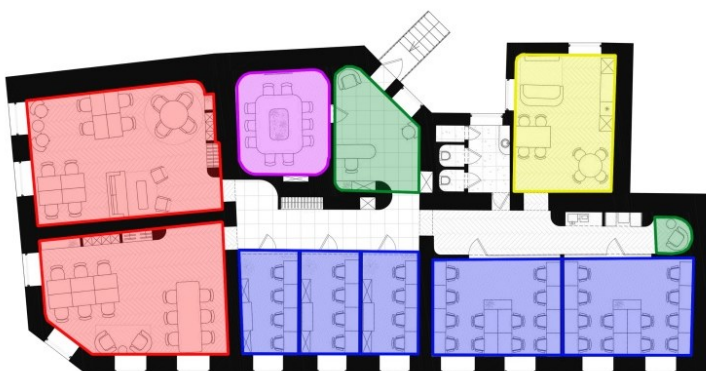
Коворкинг-пространство – 300 м², 50 чел. Коллективный офис – 30–45 м², 8–16 чел.
 Рекреация – 60 м². Переговорные – 15 м², 8 чел. Обеденная зона – 20 м², 6–8 чел.

coworking [hub] г. Ташкент, Узбекистан [17]
Архитектор: architecture & design bureau, 2022 г.



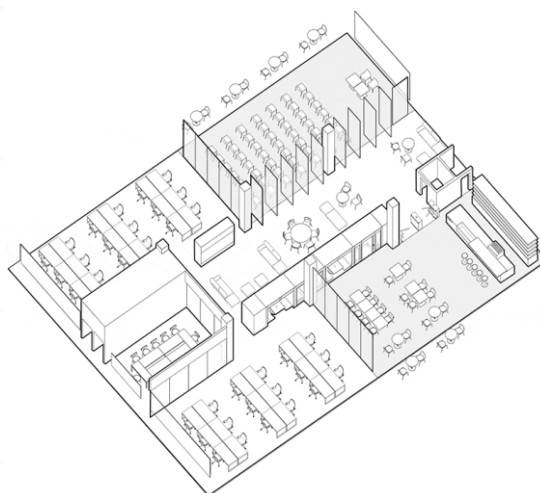
Коворкинг-пространство – 30–50 м², 10–20 чел. Коллективный офис – 10–25 м², 2–8 чел.
 Переговорные – 15 м², 8–10 чел. Индивидуальные переговорные – 2 м², 1 чел.
 Рекреация – 25 м², 5 чел. Обеденная зона – 20 м²

Коворкинг «Проспект», г. Санкт-Петербург, Россия [18]
Архитектор: AMG Architects, 2021 г.



Коворкинг-пространство – 40 м², 15–20 чел. Коллективный офис – 15–30 м², 4–12 чел.
 Рекреация – 20 м². Переговорные – 20 м², 10 чел., Обеденная зона – 20 м², 12 чел.

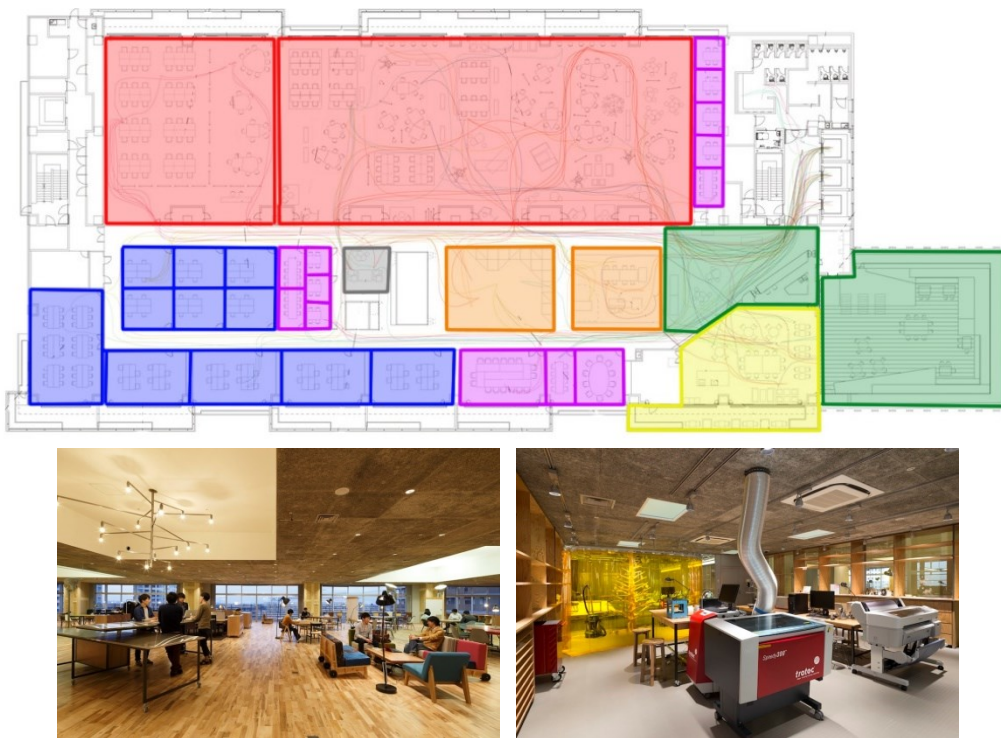
Комьюнити-коворкинг, г. Москва, Россия, 2020 г. [19]



Коворкинг-пространство – 220 м², 45 чел. Конференц-зал – 70 м², 60 чел.
 Переговорные – 25 м², 12 чел. Индивидуальные переговорные – 3 м², 1–2 чел.
 Рекреация – 20 м², 5 чел. Обеденная зона – 60 м²

Культурное пространство «Кластер Октава», г. Тула, Россия [20]**Архитектор: Orchestra Design, 2018 г.**

Коворкинг-пространство – 20–50 м², 10–20 чел. Коллективный офис – 10–25 м², 5–10 чел.
 Рекреация – 25 м², 5 чел. Обеденная зона – 30–100 м².
 Пространство для мероприятий – 450–1200 м² Конференц-зал – 350 м²

Коворкинг-парки**Kashiwa-no-ha Open Innovation Lab, г. Касива, Япония [21]****Архитектор: Naruse Inokuma Architects, 2014 г.**

Коворкинг-пространство – 800 м², 170 чел. Инновационные офисы – 20–50 м², 8–36 чел.
 Рекреация – 250 м². Переговорные – 10–40 м², 4–20 чел.
 Пространства для мероприятий – 60 м², 25 чел. Обеденная зона – 150 м², 60 чел.

RDM Campus, г. Роттердам, Нидерланды



Кампус для образования, бизнеса и мероприятий. На RDM Campus образовательные учреждения и компании работают вместе для достижения устойчивых и инновационных решений

Функциональные блоки и зоны: инновационные мастерские, лаборатории, коллективные офисы, производственные мастерские, рекреация, обеденная зона.

Условные обозначения к таблице:

— коворкинг-пространство; — кабинеты; — переговорные; — обеденная зона;
— конференц-зал; — залы для мероприятий; — рекреация

Вместе с развитием и масштабом архитектурно-планировочной структуры сменяется универсальность коворкинг-центра в сторону его узкой специализации.

Предлагается ввести новые следующие определения, раскрывающие суть коворкинг-центра как архитектурного объекта и его систему развития.

- Коворкинг-пространство – это функциональная зона, представляющая собой общее гибкое и трансформируемое пространство, зачастую универсальное, состоящее из нескольких коворкинг-площадок для разных групп работников. Также в коворкинг-пространстве располагаются дополнительно опции обслуживания, необходимые для ведения различных видов совместной и индивидуальной деятельности.

- Коворкинг-центр – это комплекс, имеющий конкретную специфику и направленность основного вида деятельности, состоящий из одного или нескольких коворкинг-пространств и отдельного функционального блока с помещениями для ведения проведения мероприятий, встреч, обучения и т.п.

- Коворкинг-парк – это тип объекта, имеющий узконаправленную специализацию проводимого рабочего процесса, состоящий из одного или нескольких комплексов (коворкинг-центров) разной направленности, взаимодополняющих друг друга, и отдельных блоков дополнительных и обслуживающих помещений и зон рекреации.

Схема развития планировочной структуры коворкинг-центров по уровням показана на рисунке 1.

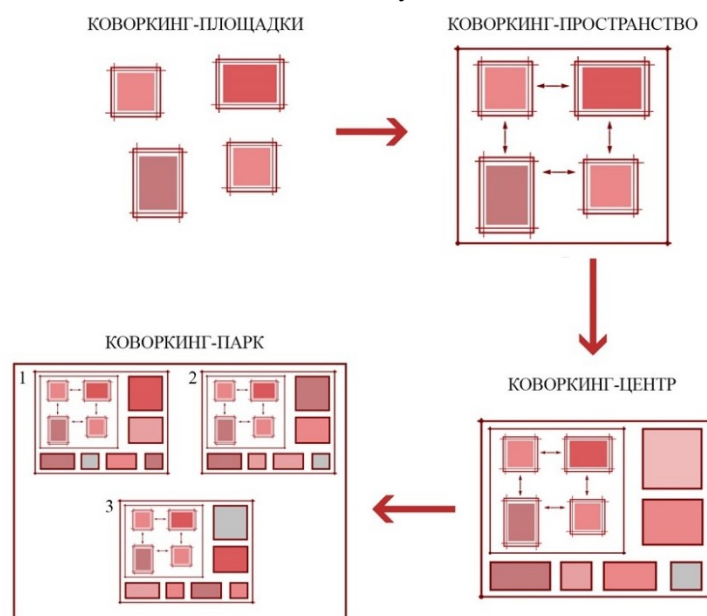


Рис. 1. Схема развития планировочной структуры

Минимальной функциональной единицей, предназначенной для работы небольшой группы работников, свободно взаимодействующих друг с другом, является коворкинг-площадка. Располагаясь на одном общем пространстве, они являются неотъемлемыми частями коворкинг-пространства. Как правило, оно носит универсальный характер и обладает гибкой структурой, адаптирующейся под необходимые рабочие процессы или проводимые мероприятия. Также именно в коворкинг-пространстве происходит самая основная функция – обмен идеями и навыками, формирование сообществ, выстраивание рабочего процесса и использование дополнительных средств для работы.

Следующий уровень развития планировочной структуры, самый распространенный – коворкинг-центр. При увеличении площадей, количества работников, возникают дополнительные функциональные блоки, обслуживающие посетителей и работников. В зависимости от типа деятельности и специфики учреждения, можно выделить коворкинг-центр универсального типа (с равнозначными дополнительными блоками помещений) и с доминирующей функцией (один блок вспомогательных помещений будет более развитым). На рисунке 1 показана схема планировочной структуры коворкинг-центра универсального типа.

Коворкинг-парки являются более редким случаем развития планировочной структуры коворкинг-центров. Они формируются при объединении нескольких коворкинг-центров разной направленности в общую структуру и предназначаются для работы узкого профиля.

Выводы. В рамках выбранной темы была проведён ранее не осуществлявшийся анализ планировочной структуры коворкингов, для чего, в ходе работы, были изучены различные научные и публицистические источники, систематизированы использованные в них определения коворкинга, что показало необходимость выделения отдельного термина для вида деятельности, и отдельного - для типа объекта. Кроме того, анализ отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства коворкинг-центров позволил раскрыть суть коворкинг-центра как типа объекта. Предложенные новые определения коворкинг-центра и система его развития позволили установить особенности его архитектурно-планировочной структуры. Выявление же особенностей позволило составить принципиальную схему развития структуры коворкинга. Всё это позволяет расширить понимание темы коворкинга и созданы предпосылки для построения типологии объектов совместной деятельности и

развития данного направления городской инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pauline Roussel. Around the world in 250 coworking spaces / Pauline Roussel, Dimitar Inchev // Hello Glocal Ltd, Plovdiv. 2021. 350 с.
2. Чистякова О.В. Инфраструктурное обеспечение инновационной предпринимательской деятельности в ресурсно-ориентированных регионах : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 08.00.05 / Чистякова Ольга Владимировна ; науч. рук. Нижегородцев Р.М. ; Росс. эконом. ун-т им. Г.В. Плеханова – Москва : [б. и.], 2016. URL: <https://www.dissercat.com/content/infrastrukturnoe-obespechenie-innovatsionnoi-predprinimatelskoi-deyatelnosti-v-resursno-orie>
3. Ананина Р.Ф. Совершенствование организации совместных закупок потребительских товаров как формы услуг в кооперационно-сетевых взаимодействиях : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 00.00.00 / Ананина Римма Фанавиевна ; науч. рук. Куимов В.В. ; Сибирский федеральный университет – Красноярск : [б. и.], 2022. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-organizatsii-sovmestnykh-zakupok-potrebitelskikh-tovarov-kak-formy-uslug>
4. Заверза Е.В. Формирование региональной инфраструктуры развития малого инновационного бизнеса : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 08.00.05 / Заверза Елена Викторовна ; науч. рук. Воронина Л.А. ; Юго-Западный государственный университет – Краснодар : [б. и.], 2019. URL: <https://www.dissercat.com/content/formirovanie-regionalnoi-infrastrukтуры-razvitiya-malogo-innovatsionnogo-biznesa>
5. Харапудченко О.В. Обучение студентов магистратуры устному иноязычному научному дискурсу на основе интерактивной технологии : диссертация на соискание ученой степени кандидата педагогических наук : 00.00.00 / Харапудченко Ольга Владимировна ; науч. рук. Обдалова О.А. ; Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н. А. Добролюбова – Нижний Новгород : [б. и.], 2021. URL: <https://www.dissercat.com/content/obuchenie-studentov-magistratury-ustnomu-inoyazychnomu-nauchnomu-diskursu-na-osnove-interakt>
6. Мишутина О.В. Формирование коммуникативной готовности студентов –

будущих химиков к профессиональной деятельности в условиях технопарков средствами иностранного языка : диссертация на соискание ученой степени кандидата педагогических наук : 13.00.08 / Мишутина Ольга Валерьевна ; науч. рук. Сохранов В.В. ; Казанский национальный исследовательский технологический университет – Казань : [б. и.], 2019. URL:

<https://www.dissercat.com/content/formirovanie-kommunikativnoi-gotovnosti-studentov-budushchikh-khimikov-k-professionalnoi-dey>

7. Харченко В.С. Фриланс как стиль жизни в современном российском обществе : диссертация на соискание ученой степени кандидата социологических наук : 22.00.06 / Харченко Вера Сергеевна ; науч. рук. Петрова Л.Е. ; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина – Екатеринбург : [б. и.], 2013. URL: <https://www.dissercat.com/content/frilans-kak-stil-zhizni-v-sovremennom-rossiiskom-obshchestve>

8. Савилова С.Л. Новейшая иноязычная лексика в русском студенческом социолекте XXI века : диссертация на соискание ученой степени кандидата филологических наук : 10.02.01 / Савилова Светлана Леонидовна ; науч. рук. Щитова О. Г. ; Том. политехн. ун-т. Томск : [б. и.], 2016. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000549181>.

9. Гнеденко Е.П. Продвижение городских креативных пространств в социальных медиа: дис. магистра журналистики. СПб. 2015. 172 с.

10. Ягодкина П.А. Что есть коворкинг? Преимущества и недостатки // Вестник молодых ученых Самарского Государственного Экономического Университета. 2015. №2(32). С. 198-201.

11. Фьерару В. А. Общественные и коворкинг-пространства: взаимосвязь и роль в пространственном развитии Санкт-Петербурга // Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Комитет по экономической политике и стратегическому планированию Санкт-Петербурга. 2016. №32(74). С. 70–72.

12. Артюхин Я.Н. "Коворкинг" как пример акмеологической среды // Акмеология. 2013. №. S1. С. 135–135.

13. Office for Architecture Studio and Coworking Space. As – Built. [Электронный

ресурс] // URL: https://www.archdaily.com/590051/office-for-architecture-studio-and-coworking-space-as-nil-built?ad_source=search&ad_medium=projects_tab. (Дата обращения: 14.10.2024).

14. T Square Coworking Space / Stateline No. 7 Architects. [Электронный ресурс] // URL: https://www.archdaily.com/996460/t-square-coworking-space-stateline-no-7-architects?ad_source=search&ad_medium=projects_tab. (Дата обращения: 14.10.2024).

15. Armazem Cowork / oitoo. [Электронный ресурс] // URL: <https://www.archdaily.com/953607/armazem-cowork-oitoo>. (Дата обращения: 14.10.2024).

16. Hello Monday Coworking Space Lounge / Bananafish. [Электронный ресурс] // URL: https://www.archdaily.com/1001336/hello-monday-coworking-space-lounge-bananafish?ad_source=search&ad_medium=projects_tab. (Дата обращения: 14.10.2024).

17. Coworking [hub] / architecture & design bureau. [Электронный ресурс] // URL: https://www.archdaily.com/987415/coworking-hub-architecture-and-design-bureau-a-kitekt?ad_source=search&ad_medium=projects_tab. (Дата обращения: 14.10.2024).

18. Коворкинг «Проспект». Опенспейс. [Электронный ресурс] // URL: <https://archi.ru/projects/russia/17464/kovorking-prospekt>. (Дата обращения: 14.10.2024).

19. Комьюнити-коворкинг. Новый формат для работы и встреч. [Электронный ресурс] // URL: <https://designmate.ru/read/objects/community-coworking-new-format-for-work-and-meetings>. (Дата обращения: 14.10.2024).

20. Octava Cluster Cultural Space / Orchestra Design. [Электронный ресурс] // URL: https://www.archdaily.com/921340/octava-cluster-cultural-space-orchestra-design?ad_source=search&ad_medium=projects_tab. (Дата обращения: 14.10.2024).

21. Kashiwa-no-ha Open Innovation Lab / Naruse Inokuma Architects. [Электронный ресурс] // URL: https://www.archdaily.com/521475/kashiwa-no-ha-open-innovation-lab-naruse-inokuma-architects?ad_medium=gallery. (Дата обращения: 14.10.2024).

Информация об авторах

Тонких Вячеслав Дмитриевич, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: vyacheslav.tonkikh95@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская улица, д. .

Перов Федор Викторович, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектурного проектирования. E-mail: f.perov@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская улица, д..

Поступила 28.10.2024 г.

© Тонких В.Д., Перов Ф.В., 2025

**Tonkikh V.D., Perov F.V.*

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: vyacheslav.tonkikh95@yandex.ru*

PLANNING STRUCTURE OF COWORKING CENTERS

Abstract. *The article describes coworking as a modern form of workspaces for collective activity. The object, subject and methods of research, on the basis of which this work was carried out, are defined. The objects of the study were coworking centers designed and built both in Russia and abroad. The subject of the study is the features of the architectural and planning structure of coworking centers. The analysis of domestic and foreign experience in the design and construction of coworking centers was carried out, their architectural and planning structures were analyzed, groups of premises, functional zones and functional blocks and their characteristics (capacity) reflecting the architectural and planning structure of coworking centers were identified. The existing concepts of coworkings were analyzed: in view of their number and diversity, this concept is divided into coworking as a type of joint activity and a coworking center - an object where this activity primarily takes place. Based on the definitions and analysis of design experience, the author's concept of a coworking center as a type of object is given. Based on the research of functional blocks and zones in coworking centers, a hierarchy of their form by the level of development of the planning structure is proposed: coworking sites, coworking space, coworking center, coworking park. Conclusions are made about the possible continuation of the research and the construction of a typology of joint activity objects.*

Keywords: *coworking, coworking space, planning structure, coworking center, coworking park.*

REFERENCES

1. Pauline Roussel, Dimitar Inchev. Around the world in 250 coworking spaces. Hello Glocal Ltd, Plovdiv. 2021. 350 p.

2. Chistyakova O.V. Infrastructure support for innovative entrepreneurial activity in resource-oriented regions: dissertation for the degree of candidate of economic sciences: 08.00.05 / Chistyakova Olga Vladimirovna; scientific supervisor Nizhegorodtsev R.M.; [Infrastrukturnoe obespechenie innovatsionnoy predprinimatel'skoy deyatel'nosti v resursno-orientirovannykh regionakh : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk : 08.00.05 / Chistyakova Ol'ga Vladimirovna ; nauch. ruk. Nizhegorodtsev R.M.]. Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov – Moscow: [b. i.], 2016. URL: <https://www.dissercat.com/content/infrastrukturnoe-obespechenie-innovatsionnoi-predprinimatelskoi-deyatelnosti-v-resursno-orie> (rus)

3. Ananina R.F. Improving the organization of joint purchases of consumer goods as a form of services in cooperative network interactions: dissertation for the degree of candidate of economic sciences: 00.00.00 / Ananina Rimma Fanavievna; scientific supervisor Kuimov V.V.; [Sovershenstvovanie organizatsii sovmestnykh zakupok potrebitel'skikh tovarov kak formy uslug v kooperatsionno-setevykh vzaimodeystviyakh :

dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk : 00.00.00 / Ananina Rimma Fanavievna ; nauch. ruk. Kuimov V.V.]. Siberian Federal University - Krasnoyarsk: [b. i.], 2022. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-organizatsii-sovmestnykh-zakupok-potrebitelskikh-tovarov-kak-formy-uslug> (rus)

4. Zaverza E.V. Formation of regional infrastructure for the development of small innovative business: dissertation for the degree of candidate of economic sciences: 08.00.05 / Zaverza Elena Viktorovna; scientific supervisor Voronina L.A.; [Formirovanie regional'noy infrastruktury razvitiya malogo innovatsionnogo biznesa : dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk : 08.00.05 / Zaverza Elena Viktorovna ; nauch. ruk. Voronina L.A.]. South-West State University – Krasnodar: [b. i.], 2019. URL:

<https://www.dissercat.com/content/formirovanie-regionalnoi-infrastruktury-razvitiya-malogo-innovatsionnogo-biznesa> (rus)

5. Kharapudchenko O.V. Teaching Master's students oral foreign-language scientific discourse based on interactive technology: dissertation for the degree of candidate of pedagogical sciences: 00.00.00 / Kharapudchenko Olga Vladimirovna; scientific supervisor Obdalova O. A.; [Obuchenie studentov magistratury ustnomu inoyazychnomu

nauchnomu diskursu na osnove interaktivnoj tekhnologii : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata pedagogicheskikh nauk : 00.00.00 / Harapudchenko Ol'ga Vladimirovna ; nauch. ruk. Obdalova O.A.]. Nizhny Novgorod State Linguistic University named after N. A. Dobrolyubov – Nizhny Novgorod: [b. and.], 2021. URL: <https://www.dissercat.com/content/obuchenie-studentov-magistratury-ustnomu-inoyazychnomu-nauchnomu-diskursu-na-osnove-interakt> (rus)

6. Mishutina O.V. Formation of communicative readiness of students - future chemists for professional activities in technology parks by means of a foreign language: dissertation for the degree of candidate of pedagogical sciences: 13.00.08 / Mishutina Olga Valerievna; scientific supervisor. Sokhranov V.V.; [Formirovanie kommunikativnoj gotovnosti studentov – budushchih himikov k professional'noj deyatel'nosti v usloviyah tekhnoparkov sredstvami inostrannogo yazyka : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata pedagogicheskikh nauk : 13.00.08 / Mishutina Ol'ga Valer'evna ; nauch. ruk. Sokhranov V.V.]. Kazan National Research Technological University - Kazan: [b. and.], 2019. URL: <https://www.dissercat.com/content/formirovanie-kommunikativnoi-gotovnosti-studentov-budushchikh-khimikov-k-professionalnoi-dey> (rus)

7. Kharchenko V.S. Freelancing as a lifestyle in modern Russian society: dissertation for the degree of candidate of sociological sciences: 22.00.06 / Kharchenko Vera Sergeevna; scientific supervisor Petrova L.E.; [Frilans kak stil' zhizni v sovremennom rossijskom obshchestve : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata sociologicheskikh nauk : 22.00.06 / Harchenko Vera Sergeevna ; nauch. ruk. Petrova L.E.]. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin - Ekaterinburg: [b. and.], 2013. URL: <https://www.dissercat.com/content/frilans-kak-stil-zhizni-v-sovremennom-rossiiskom-obshchestve> (rus)

8. Savilova S. L. The latest foreign language vocabulary in the Russian student sociolect of the 21st century: dissertation for the degree of candidate of philological sciences: 10.02.01 / Savilova Svetlana Leonidovna; scientific director Shchitova O. G. [Novejshaya inoyazychnaya leksika v russkom studencheskom sociolekte XXI veka : dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata filologicheskikh nauk : 10.02.01 / Savilova Svetlana Leonidovna ; nauch. ruk. SHCHitova O. G.]. Tom. politekhn. unt. Tomsk : [b. i.], 2016. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000549181>. (rus)

9. Gnedenko E.P. Promotion of urban creative spaces in social media [Prodvizhenie gorodskih

kreativnyh prostranstv v social'nyh media]: dis. magistra zhurnalistiki. SPb. 2015. 172 p. (rus)

10. Yagodkina P.A. What is coworking? Advantages and disadvantages [CHto est' kovorking? Preimushchestva i nedostatki]. Vestnik molodyh uchenykh Samarskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta. 2015. No. 2 (32). P. 198-201. (rus)

11. F'eraru V.A. Public and coworking spaces: relationship and role in spatial development of St. Petersburg [Obshchestvennye i kovorking-prostranstva: vzaimosvyaz' i rol' v prostranstvennom razvitii Sankt-Peterburga]. Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet, Komitet po ekonomicheskoy politike i strategicheskomu planirovaniyu Sankt-Peterburga. 2016. No. 32 (74). Pp. 70–72. (rus)

12. Artyuhin Ya.N. "Coworking" as an example of acmeological environment ["Kovorking" kak primer akmeologicheskoy sredy]. Akmeologiya. 2013. No. S1. Pp. 135–135. (rus)

13. Office for Architecture Studio and Coworking Space. As – Built. [Electronic resource] URL: https://www.archdaily.com/590051/office-for-architecture-studio-and-coworking-space-as-nil-built?adsourc=search&ad_medium=projects_tab. (Accessed: 14.10.2024). (rus)

14. T Square Coworking Space. Stateline No. 7 Architects. [Electronic resource] URL: https://www.archdaily.com/996460/t-square-coworking-space-stateline-no-7-architects?ad_source=search&admedium=projects_t ab. (Accessed: 14.10.2024). (rus)

15. Armazem Cowork. oitoo. [Electronic resource] URL: <https://www.archdaily.com/953607/armazem-cowork-oitoo>. (Accessed: 14.10.2024). (rus)

16. Hello Monday Coworking Space Lounge. Bananafish. [Electronic resource] URL: https://www.archdaily.com/1001336/hello-monday-coworking-space-lounge-bananafish?ad_source=search&ad_medium=project_s_tab. (Accessed: 14.10.2024). (rus)

17. Coworking [hub]. Architecture & design bureau. [Electronic resource] URL: https://www.archdaily.com/987415/coworking-hub-architecture-and-design-bureau-a-kitekt?ad_source=search&ad_medium=projects_tab. (Accessed: 14.10.2024). (rus)

18. Kovorking «Prospekt». Openspejs. [Electronic resource] URL: <https://archi.ru/projects/russia/17464/kovorking-prospekt>. (Accessed: 14.10.2024). (rus)

19. Kom'yuniti-kovorking. Novyj format dlya raboty i vstrech.. [Electronic resource] // URL: <https://design-mate.ru/read/objects/community->

coworking-new-format-for-work-and-meetings.
(Accessed: 14.10.2024). (rus)

20. Octava Cluster Cultural Space. Orchestra Design. [Electronic resource] URL: https://www.archdaily.com/921340/octava-cluster-cultural-space-orchestra-design?ad_source=search&ad_medium=projects_tab b. (Accessed: 14.10.2024). (rus)

21. Kashiwa-no-ha Open Innovation Lab. Naruse Inokuma Architects. [Electronic resource] URL: https://www.archdaily.com/521475/kashiwa-no-ha-open-innovation-lab-naruse-inokuma-architects?ad_medium=gallery. (Date of access: 10.14.2024). (rus)

Information about the authors

Tonkikh, Vyacheslav D. Postgraduate student of the architectural design department. E-mail: vyacheslav.tonkikh95@yandex.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st, 4.

Perov, Fedor V. PhD in architecture, associate professor of the architectural design department. E-mail: f.perov@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st,

Received 28.10.2024

Для цитирования:

Тонких В.Д., Перов Ф.В. Планировочная структура коворкинг-центров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 84–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-84-95

For citation:

Tonkikh V.D., Perov F.V. Planning structure of coworking centers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 84–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-84-95

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-96-111

Перькова М.В., *Ладик Е.И., Грачева А.А., Дребезгова М.Ю.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
*E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНОГО ФАСАДА НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ УСТЬЯ РЕКИ ВОЛХОВ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. В последние десятилетия в России все больше внимания уделяется сохранению исторического наследия и развитию туристического потенциала малых городов и поселений. Малые города и поселения на реке Волхов в Ленинградской области являются значимыми объектами культурного наследия, обладающими высоким культурно-туристическим потенциалом. В статье рассмотрены особенности формирования водных фасадов в границах населенных пунктов, расположенных вдоль береговой линии устья реки Волхов: г. Новая Ладога, д. Глядково, д. Немайново - 1, д. Немайново - 2, д. Березье, д. Юшково, п. Речников, д. Иссад. В ходе исследования проведены ретроспективный и ландшафтно-визуальный анализ территории. Выявлены исторические вертикальные и горизонтальные доминанты, утраченные объекты, которые являются ценными градоформирующими элементами водного фасада поселений, композиционно-видовые связи и панорамы. Проанализированы композиция и силуэт застройки, бассейны видимости. Предложены принципы формирования водного фасада исторических поселений: 1) сохранение и восполнение визуальных горизонтальных и высотных доминант; 2) соблюдение баланса соотношения между застроенными территориями и открытыми озелененными пространствами; 3) проницаемость фронта застройки, формирование системы озелененных пешеходных улиц, бульваров, скверов, променадов; 4) формирование характерного для населенного пункта силуэта застройки; 5) регламентирование высотности застройки в зависимости от типа поселения; 6) сохранение композиционных осей и связей. Разработаны рекомендации по формированию водного фасада населенных пунктов устья реки Волхов в Ленинградской области с целью развития туристско-рекреационных территорий.

Ключевые слова: водный фасад, приречные территории, историко-культурный потенциал, туристические маршруты, река Волхов

Введение. В последние десятилетия в России все больше внимания уделяется сохранению исторического наследия и развитию туристического потенциала малых городов и поселений. Малые города и поселения на реке Волхов в Ленинградской области являются значимыми объектами культурного наследия, обладающими высоким культурно-туристическим потенциалом [1,2]. Однако они подвержены различным угрозам, таким как высокая антропогенная нагрузка, деградация прибрежных ландшафтов, разрушение объектов культурного наследия (далее ОКН) и потеря архитектурной идентичности.

Одним из важных критериев сохранения архитектурной идентичности малых городов и поселений является сохранение композиционных связей в структуре сложившейся застройки [3]. Для поселений, расположенных на приречных территориях, особую роль играет формирование и сохранение водного фасада. Водный фасад является значимым градостроительным элементом. [4]. Речные панорамы выполняют ориентационную, художественную и семантическую функции. Выполнение этих функций в градостроительной системе происходит через доминантные объекты и архитектурно-ландшафтные ансамбли

[5]. Водные фасады активно участвуют в становлении образа города. Формирование водных фасадов исторических поселений устья реки Волхов имеет свои особенности, связанные с исторической и культурной составляющей региона.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью сохранения и изучения приречных территорий малых исторических поселений устья реки Волхов как важных составляющих национальной идентичности, неотъемлемых элементов развития туристско-рекреационной инфраструктуры региона и формирования водного фасада. Исследование приречных территорий, а также особенностей водного фасада данных городских и сельских поселений является актуальным для выявления их потенциала, перспектив градостроительного развития, улучшения качества жизни населения, формирования благоприятной среды жизнедеятельности.

Для изучения этих аспектов необходимо выполнение историко-архитектурных и градостроительных исследований. Исследование водных фасадов поселений устья реки Волхов позволит проанализировать процессы формирования застройки в разрезе различных временных периодов, рассмотреть особенности архитектурной

среды, выделить архитектурные доминанты и элементы идентичности. Результаты комплексного анализа формирования водных фасадов должны быть учтены при разработке стратегий по сохранению и развитию приречных территорий в структуре малых городов и поселений, а также на межселенных территориях при формировании туристических маршрутов и развития инфраструктуры гостеприимства.

Целью исследования является выявление принципов формирования водных фасадов исторических поселений устья реки Волхов и разработка рекомендаций по формированию водного фасада населенных пунктов устья реки Волхов в Ленинградской области.

Объект исследования: приречные территории в населенных пунктах и межселенных территориях устья реки Волхов.

Материалы и методы исследования. В процессе исследования использовались методы изучения и анализа нормативно-правовых документов, литературных источников, ретроспективный анализ освоения территории, фотофиксация, натурные и камеральные исследования, визуально-ландшафтный анализ. Применялись комплексный и конфликтологический подходы для выявления интересов участников градостроительной деятельности, а также для переосмысления вариантов функционального зонирования.

Исследование опирается на труды отечественных ученых Краснощековой Н.С., Благовидовой Н.Г. и Волковой Н.А., Большакова А.Г., Вайтенса А.Г., Перьковой М.В. В рамках исследования рассмотрены работы Семенцова С.И., Лутченко С.И., посвященные изучению историко-культурного потенциала территорий Ленинградской области, однако особенности организации приречных территорий, а также исследование процесса формирования водного фасада исторических поселений в устье реки Волхов до настоящего времени остаются недостаточно изученными. Для развития туризма, основанного на историко-культурной идентичности Ленинградской области и формировании водных маршрутов необходимо дальнейшее изучение особенностей градостроительного развития и организации приречных территорий в исторических поселениях.

Анализ водных фасадов малых городов и поселений устья реки Волхов. Исторически важнейшим градоформирующим природным фактором являлось наличие реки [6]. Населённые пункты на рассматриваемой территории появлялись и развивались в уникальных природных условиях в различные исторические периоды. Доминирующая функция водного объекта в планировочной структуре и укладе жизни поселений

изменялась, что влияло на преобладающее функциональное назначение застройки, размещаемой на прибрежных территориях. Ретроспективный анализ территории выявил, что первые славянские поселения появились на берегах Волхова в VI–VII вв. [7]. В славянской мифологии реки наделялись сакральным значением, воспринимались как источник жизни и место обитания духов. Реки отражены в фольклоре, песнях, обрядах, являясь неотъемлемой частью славянской культуры. В IX–XII по реке Волхов проходил исторический торговый путь между племенами, жившими по Балтийскому морю «Из Варяг в Греки», бывший основой экономики Древней Руси. В связи с этим историческое значение реки Волхов сложно переоценить. В XIV–XV вв. на небольшом полуострове Медведец был основан Николо-Медведский монастырь. Изначально, он являлся укрепленной пограничной крепостью, благодаря чему его защитники успешно отражали нападения иностранных захватчиков. Бело-снежный шпиль колокольни благодаря удачному расположению виден издали. В 1704 г. по указу Петра I был основан город Новая Ладога. В связи с этим древний город Ладога стал называться Старой Ладогой. Царь велел многим жителям Старой Ладоги переселиться в Новую Ладогу, а из центра страны приказал передислоцировать несколько полков пехоты. С середины XVIII в. Новая Ладога стала центром Новолadoжского уезда. Деревня Иссад впервые упоминается в Новгородских летописях в 1228 г. Слово «Исад» имеет древнерусское происхождение и означает «место высадки на берегу», «пристань», «торговая пристань», «базар», где привозили различные припасы, а также «рыбачью слободу» или «посёлок у берега». В XVI в. в рыбацком селе находился Троицкий на Златыни мужской монастырь, который был разорен в Смутное время. Упоминания о монастыре относятся к 1582 г. Позднее, в 1789 г., был построен и освящен новый Троицкий храм вместо сгоревшего. А в 1864 г. на месте старого храма архитектором Брандтом К.И. был введен каменный храм по проекту Тона К.А.

Таким образом, особенности формирования водного фасада исторических поселений устья реки Волхов имеют свою специфику и связано с географическим положением территорий и пересечением водных путей, что делает его важным транспортным узлом. Рассматриваемые поселения имеют богатую историю, связанную с ролью Волхова как важного торгового и культурного центра в средние века [8, 9]. Водный фасад поселений является их важнейшим градостроительным элементом, важной и неотъемлемой частью малых городов и поселений у воды, так как он отражает культурную и природную идентичность

региона, формирует уникальный образ поселения и способствует развитию туризма. Стоит отметить, что малое количество исторических городов сохранили первоначальный облик приречных территорий. В рамках исследования рассмотрены населенные пункты устья реки Волхов: г. Новая Ладога, д. Глядково, д. Немагово – 1, д. Немагово – 2, д. Березье, д. Юшково, п. Речников, д. Иссад. При этом город Новая Ладога обладает статусом исторического поселения. Рассматриваемые территории обладают потенциалом для развития экологического и культурно-познавательного туризма (рис.1). Водный фасад этих поселений является их «визитной карточкой» и способствует развитию туристической отрасли. В ходе исследования водного фасада территорий устья Волхов был проанализирован визуально-пространственный образ, сформированный основными видовыми точками и ракурсами обзора [10].

В процессе исследования изучались исторические фотографии малых городов и поселений, расположенных в устье реки Волхов. Были проанализированы: 1) сохранность элементов, формирующих пространство; 2) расположение исторических архитектурных доминант; 3) ценные объекты, формирующие облик города (с указанием утраченных объектов, которые в ранее являлись частью доминанты и значительно влияли на композицию); 4) характеристики фоновой застройки; 5) восприятие вида в определенный исторический период (рис.1-3.). Ландшафтно-визуальный анализ позволил выявить основные композиционные оси. К ним относятся водные артерии: река Волхов, Староладожский и Новоладожский каналы, а также Старо- и Ново-Свирские каналы. Также были определены транспортные оси: Мурманское шоссе, трасса А-114 в деревне Иссад, улицы Суворова, Пролетарский канал и Карла Маркса в Новой Ладоге. Проанализированы композиционно-видовые связи и панорамы (рис. 2–3). Выявлено, что основные вертикальные доминанты расположены в д. Иссад, г. Новая Ладога, д. Немагово – 1, д. Немагово – 2: в д. Иссад храмовый ансамбль, включающий храм Святой Троицы Живоначальной и церковь Модеста патриарха Иерусалимского; в д. Немагово – 1 Белый маяк; в д. Немагово – 2 Красный маяк; в г. Новая Ладога храмовый ансамбль, включающий собор Николая Чудотворца и Николо-Медведский монастырь, Церковь Климента Римского и Петра Александрийского, Церковь Спаса Нерукотворного образа, Георгиевская (Суворовская) церковь.

Ретроспективный анализ выявил, как облик водных фасадов претерпевал изменения в различные исторические периоды. В исторических

поселениях вертикальными доминантами, как правило, являлись культовые сооружения. Некоторые объекты культурного наследия были утрачены либо находятся в неудовлетворительном состоянии. Например, церковь Модеста, патриарха Иерусалимского в д. Иссад находится в настоящее время в неудовлетворительном состоянии, что влияет на ее восприятие в качестве архитектурной доминанты. Храм Климента Римского и Петра Александрийского в г. Новой Ладога также находится в аварийном состоянии. Перечисленные объекты являются важными градостроительными элементами, определяющими облик поселений. Утрата вертикальных доминант искажает восприятие исторически сложившегося водного фасада. Развитие промышленности в советское время также внесло свои коррективы в силуэтность застройки и восприятие водного фасада. Выявлены видовые раскрытия и композиционно-видовые связи водного фасада устья реки Волхов (рис. 3.). Проанализирована фоновая застройка поселений, раскрытие доминант по пути следования по реке Волхов. Ограничения по высоте для сохранения визуального восприятия объекта культурного наследия были определены на основе геометрических и ландшафтных расчетов [11]. С помощью созданных бассейнов видимости определены основные пути визуального восприятия объектов культурного наследия и выявлена их потенциальная взаимосвязь с окружающей застройкой (рис.1-3).

В настоящее время целостное восприятие водных фасадов большинства поселений отсутствует, что негативно сказывается на их образе. По берегам рек с течением времени возникает фрагментарная застройка, которая в большей степени не учитывает архитектурно-ландшафтный контекст и имеет низкие эстетические характеристики. Кроме того, процессы освоения приречных территорий в современный период глобализации нивелируют архитектурную индивидуальность, идентичность поселений и водные фасады постепенно теряют свою уникальность.

В результате комплексного анализа территорий поселений выявлены следующие проблемы: новое благоустройство в ряде случаев не учитывает историко-культурную идентичность территорий, является типовым; происходит разрушение и утрата высотных доминант; происходит разрушение и утрата ОКН. Выявлены имеющиеся и потенциальные градостроительные конфликты: экологические, транспортные, правовые, землепользовательские, социально-функциональные, социокультурные. Определены участники градостроительной деятельности (рис.4). Разработана пространственная модель локаций

градостроительных конфликтов на рассматриваемых приречных территориях: отсутствие заинтересованности собственников в приспособлении ОКН; конфликт интересов муниципалитета и

собственников; ограничения ОКН для его реставрации и приспособления; конфликт интересов арендаторов, собственников и пользователей и др. (рис. 4).



Рис. 1. Анализ исторических визуальных коммуникаций в поселениях устья реки Волхов.

Сост. Перькова М.В., Кривобороденко В.А.

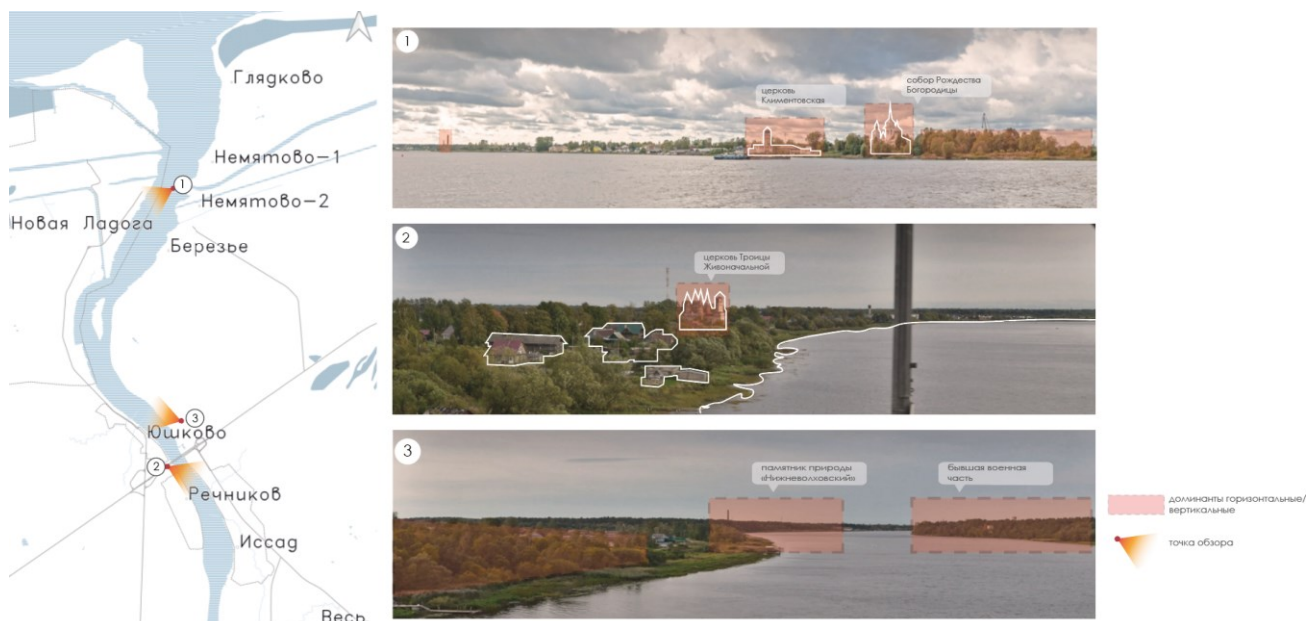


Рис. 2. Композиционно-видовые связи и панорамы исторических поселений в устье реки Волхов.

Сост. Перькова М.В., Кривобороденко В.А.



Рис. 3. Композиционно-видовые связи и панорамы исторических поселений в устье реки Волхов. Сост. Перькова М.В., Кривобороденко В.А.

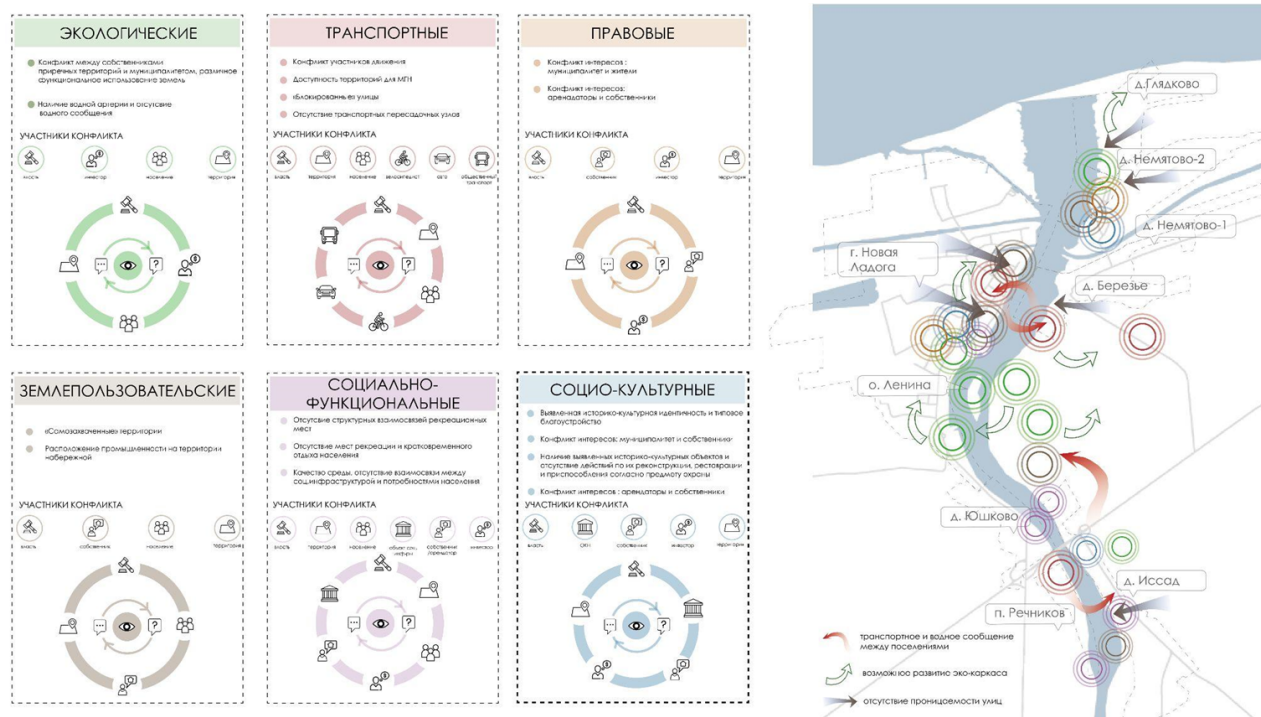


Рис.4. Классификация градостроительных конфликтов приречных территорий устья реки Волхов и их пространственная локализация. Разраб. Перькова М.В. Кривобороденко В.А.

Принципы формирования водного фасада. Силуэт исторического поселения строится на контрасте между высотными архитектурными доминантами, которые играют роль пространственных ориентиров, и фоновой застройкой. Оптимальное соотношение доминант к фоновой застройке – 1:2, 1:3, 1:4. При формировании водных фасадов кроме архитектурной составляющей следует учитывать ландшафтные особенности и элементы природного каркаса территории, которые участвуют в организации водной пано-

рамы поселения [12]. Исходя из анализа современных водных фасадов устья реки Волхов в их структуре в основном преобладают элементы озеленения в соотношении с застройкой 2:1. Рельеф в исследуемой территории не столь выразителен, композиционные акценты, в основном, представлены зелеными массивами. Водно-зеленый каркас рассматриваемых территорий не имеет непрерывного связанного экологического коридора вдоль реки Волхов. Также выявлено загрязнение береговой линии и заболенность от-

дельных участков приречных территорий. Рекреационные территории, расположенные на приречных территориях, не имеют связной структуры. В некоторых поселениях отсутствуют места рекреации и места для кратковременного отдыха.

Как правило, историческое поселение, которое преимущественно сохранило застройку у воды, в большинстве случаев имеет в силуэте культовое сооружение, которое является архитектурной доминантой [13]. Доминанты образуют систему «знаков места», хорошо запоминаются и позволяют ориентироваться на территории [14]. Композиционная значимость доминант зависит от их расположения в структуре города. Можно выделить два типа доминант: 1 – вертикальные (визуальные) и 2 – горизонтальные (функциональные). У торговых поселений у воды, как правило исторически формировались и горизонтальные функциональные доминанты, представленные пристанями и причалами. Стоит отметить, что в качестве горизонтальных визуальных доминант в структуре водного фасада могут быть рассмотрены и элементы природного каркаса территории. В исследованиях Благовидовой Н.Г. и Волковой Н.А. горизонтальным доминантам присваивается функция «...дисперсной системы ориентации» [15, 16]. Понятие дисперсности доминант говорит об их относительной свободе размещения в городе или поселении, что позволяет использовать их в «неожиданных» местах.

На исследуемых территориях выделены наиболее значимые архитектурные доминанты: в г. Новая Ладога – Собор Рождества Богородицы и Николо-Медведский мужской монастырь; Климентовская церковь и церковь Спаса Нерукотворного образа; в д. Иссад – храм Святой Тро-

ицы Живоначальной и церковь Модеста Иерусалимского. Среди вертикальных архитектурных доминант выделяется Собор Рождества Богородицы, являющейся объектом культурного наследия регионального значения. Собор имеет обзор со множества видовых точек. Многие из выделенных архитектурных доминант находятся в неудовлетворительном состоянии. Утраченные элементы влияют на их визуальное восприятие. Так здание Гостиного двора в центре города Новая Ладога находится близ приречной территории закрыто и разрушается. Необходимо включение и развитие таких точек притяжения.

На противоположном берегу реки Волхов расположены еще две значимые исторические доминанты – Александровские маяки. Знаки установлены в 1880 году, во времена царствования императора Александра II, они имеют одинаковую конструкцию, но разный цвет. Они отмечают выход из Ново-Свирского канала в реку Волхов. Маяки были выполнены в виде двух металлических башенок, внутри которых находились подъёмные механизмы для сигнальных ламп. Маяк, установленный на правом берегу канала (при движении со стороны Волхова), окрашен в белый цвет, а маяк на левом берегу в красный, что соответствует традиционным цветам знаков речной навигации. Находятся они в деревнях Нямятово – 1 и Нямятово – 2. За белым маяком видны храмы Новой Ладogi на другом берегу, за красным – слияние реки с Ладожским озером.

В качестве горизонтальных доминант выделяются: в г. Новая Ладога – торговая площадь перед Гостиным двором, в также памятник природы «Нижеволховский», являющейся общей горизонтальной доминантой рассматриваемой территории (рис.5).

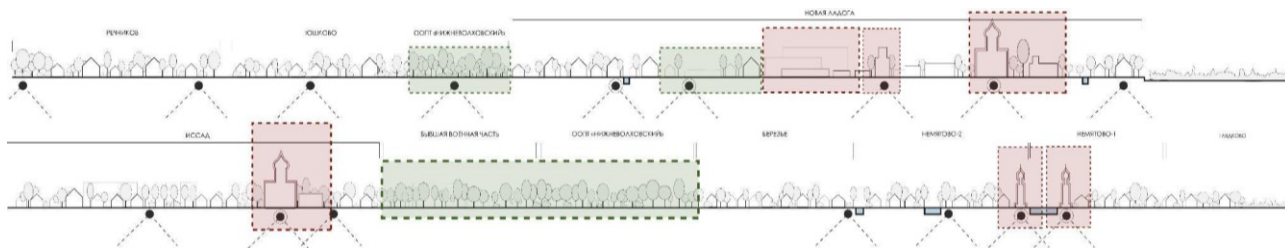


Рис. 5. Водный фасад устья реки Волхов с указанием вертикальных и горизонтальных доминант.

Разраб. Перькова М.В., Кривобороденко В.А.

Система визуальных доминант в исторических поселениях устья реки Волхов сложилась после завершения строительства церкви Святой Живоначальной Троицы в 1864 г. в деревне Иссад. Сформировались целостные панорамные виды, включающие исторические архитектурные доминанты и ансамбли. Собор Рождества Богородицы построен раньше храма в Иссаде и изна-

начально являлся центром паломничества. Первоначальное название храма Рождества Пресвятой Богородицы - храм апостола Иоанна Богослова. Церковь была построена в 1702 г. и первоначально принадлежала Николо-Медведскому монастырю, упраздненному в 1704 г. В 1733 г. к церкви пристроен придел Рождества Богородицы (рис.6).

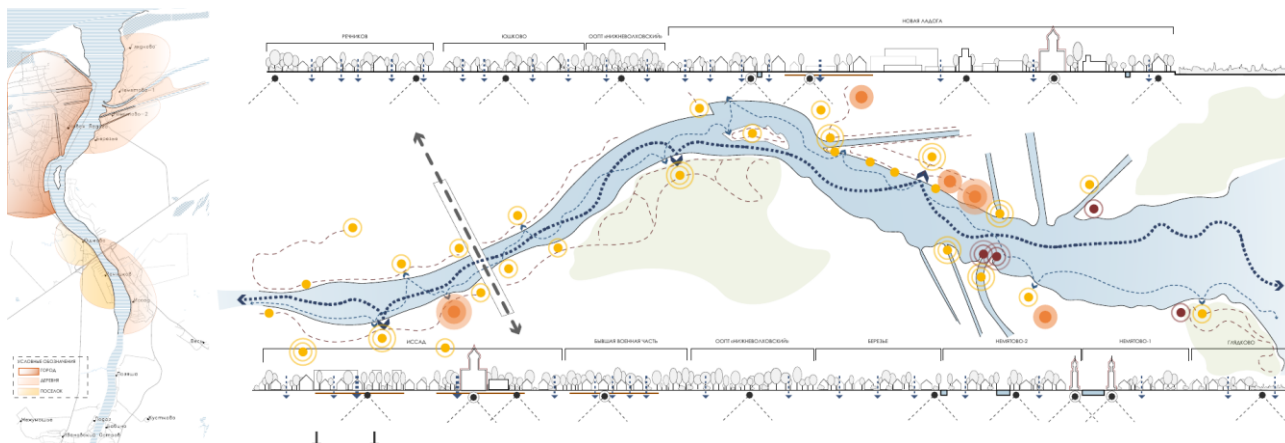


Рис. 6. Формирование водных фасадов поселений устья реки Волхов.

Сост. Перькова М.В., Кривобороденко В.А.

Помимо выявления архитектурных доминант и определения соотношений природной составляющей и городской застройки имеет значение и доступность водного объекта для населения, а именно проницаемость приречной территории. Во многих поселениях сохраняется тенденция самозахвата участков в водоохранной зоне реки, что приводит к градостроительным конфликтам, не всегда удается сохранить доступность приречной территории. Исходя из градостроительного анализа на приречной территории города Новая Ладога «блокирующим объектом» является промышленный объект, который был построен еще в советское время. Исходя из особенностей визуального восприятия городских панорам, возможно отметить значимость силуэтного восприятия застройки 1 и 2 линий. Вследствие растущей урбанизации и увеличения численности населения в городе Новая Ладога и д. Иссада развивалась застройка многоэтажными домами. В ходе визуально-ландшафтного анализа выявлено, что районы с новой застройкой диссонируют с исторической городской средой, а Собор Рождества Богородицы и храм Святой Троицы Живоначальной теряет функцию доминирования.

Современная жилая застройка во многих случаях является диссонирующей. Проанализировав здания, имеющие культурную и историческую ценность, можно определить допустимый уровень высоты застройки в луче видимости объекта [17] и определить необходимость регламентирования этажности новой застройки. При благоустройстве приречных территорий и формировании водного фасада необходимо сохранение исторических и восполнение утраченных архитектурных доминант.

В результате проведенного исследования сформулированы следующие принципы формирования водного фасада исторических поселений:

1. Сохранение и восполнение визуальных горизонтальных и высотных доминант.
2. Соблюдение баланса соотношения между застроенными территориями и открытыми озелененными пространствами.
3. Проницаемость фронта застройки, формирование системы озелененных пешеходных улиц, бульваров, скверов, променадов.
4. Формирование характерного для населенного пункта силуэта застройки.
5. Регламентирование высотности застройки в зависимости от типа поселения.
6. Сохранение композиционных осей и связей (рис. 7).

Процесс создания уникального облика водного фасада малых исторических поселений требует комплексного подхода, включающего выявление идентичности места, формирование системы доминант, развитие инфраструктуры гостеприимства, организацию точек притяжения и обеспечения качественной комфортной архитектурной среды населенных пунктов.

Разработка рекомендаций по формированию водного фасада населенных пунктов устья реки Волхов в Ленинградской области с целью развития туристско-рекреационных территорий.

Проведённый в ходе предпроектного анализа портрет внутреннего пользователя показал, что наибольшая концентрация населения находится в городе Иссада 73 % (численность населения составляет 1063), в населенных пунктах Юшково 12 %, Березье 7 %, Речников 6 %, Подол 1 %. Разделение население на социальные группы находится, на данный момент, в следующем соотношении, взрослые 52 %, молодёжь 19 %, дети 15 %, пожилые 14 %. График демографии территории с 2000 по 2025 гг. показывал свой максимум в 2010 году. Структура занятости населения показывает, что рыболовным промыслом занимается 29 % населения, 28 % занимаются оптовой и

розничной торговлей, 27 % административной деятельностью, 8 % образование, 8 % спорт.

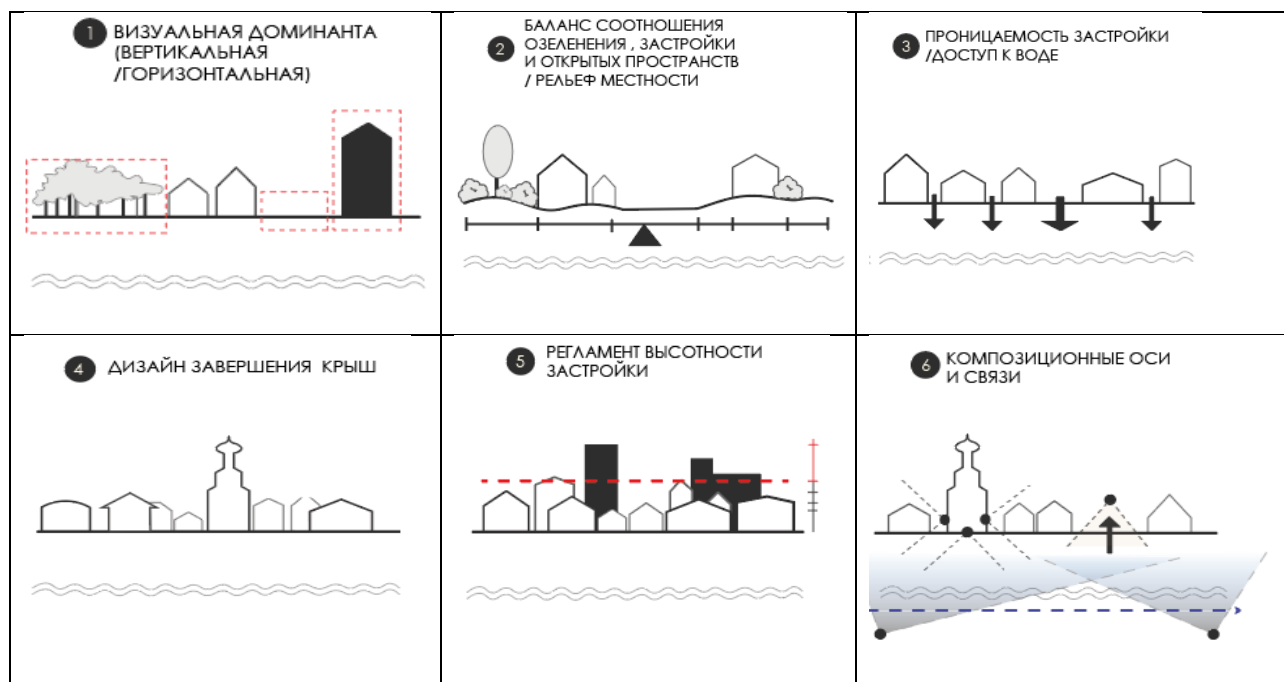


Рис. 7. Принципы формирования водного фасада малых исторических поселений.

Разраб. Пенькова М.В., Кривобороденко В.А.

Рассмотрены существующие туристические маршруты и туристические круизы. Анализируемые туристические маршруты берут свое начало в Санкт-Петербурге и следуют в различных направлениях: до Великого Новгорода, Мандроги, Ярославля (рис.8). Все маршруты проходят транзитом Старую Ладугу. Туристические маршруты Ладожского озера различаются по направлению и способу передвижения, но их объеди-

няет то, что все они, как и описанные выше круизы, не предусматривают остановки на исследуемой территории. Таким образом, перспективный поток туристов движется транзитом, не имея возможности посетить рассматриваемые поселения устья реки Волхов. Транспортная схема взаимосвязки наземного общественного транспорта (автобусы) и водного транспорта представлена на рис. 9.



Рис. 8. Схема туристических маршрутов вдоль озера Ладога. Сост. Пенькова М.В., Кривобороденко В.А.

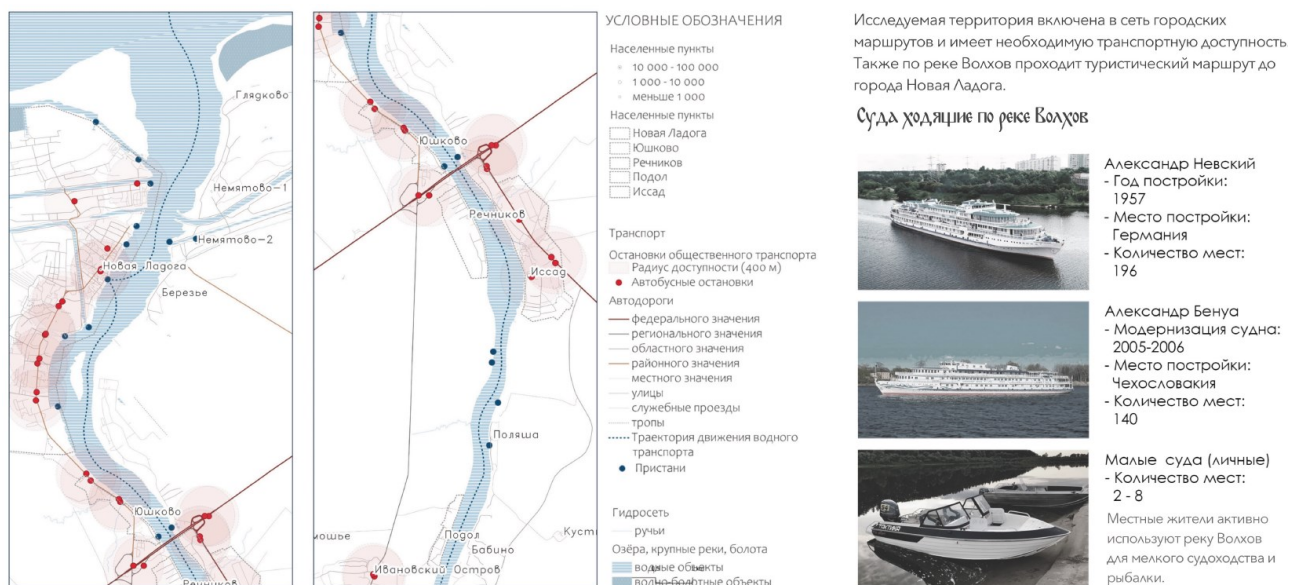


Рис. 9. Транспортная схема наземного общественного транспорта (автобусы) и водного транспорта.

Разраб. Ладик Е.И., Грачева А.А.

Анализ судоходства на реке Волхов показал, что для развития круизного туризма по Волхову внутренние водные следует перевести в первую категорию. На данный момент в период навигации, с начала мая по начало октября, по Волхову осуществляются грузовые и пассажирские круизные и скоростные (до Великого Новгорода) перевозки водным транспортом. Средняя глубина реки Волхов от Старой Ладоги до устья составляет 350 см (рис. 10). Сроки транзитной навигации зависят от графика работы шлюза Волховской ГЭС 5 мая – 31 октября. Плоский рельеф, характерный для этой территории, обуславливает ее сильную заболоченность - вдоль речной долины располагается большое число верховых болот. Следует учитывать интенсивность и направление ветровых потоков, чтобы предусмотреть меры по их снижению, например, с по-

мощью высадки деревьев. Роза ветров показывает, что преобладающее направление ветров - северное, северо-западное со средней силой ветра 5–10 м/с.

Развития транспортного каркаса предполагает:

- использование общественного транспорта и маршрутов туристических автобусов, водного маршрута теплоходов с оборудованием причалов в каждой из точек пространственного развития;
- создание в г. Новая Ладога транспортно-пересадочного узла (ТПУ), создание причалов в д. Иссад, г. Новая Ладога и на о. Ленина;
- разработку локальных велосипедных маршрутов, выполняющих роль обзорных для каждой точки.

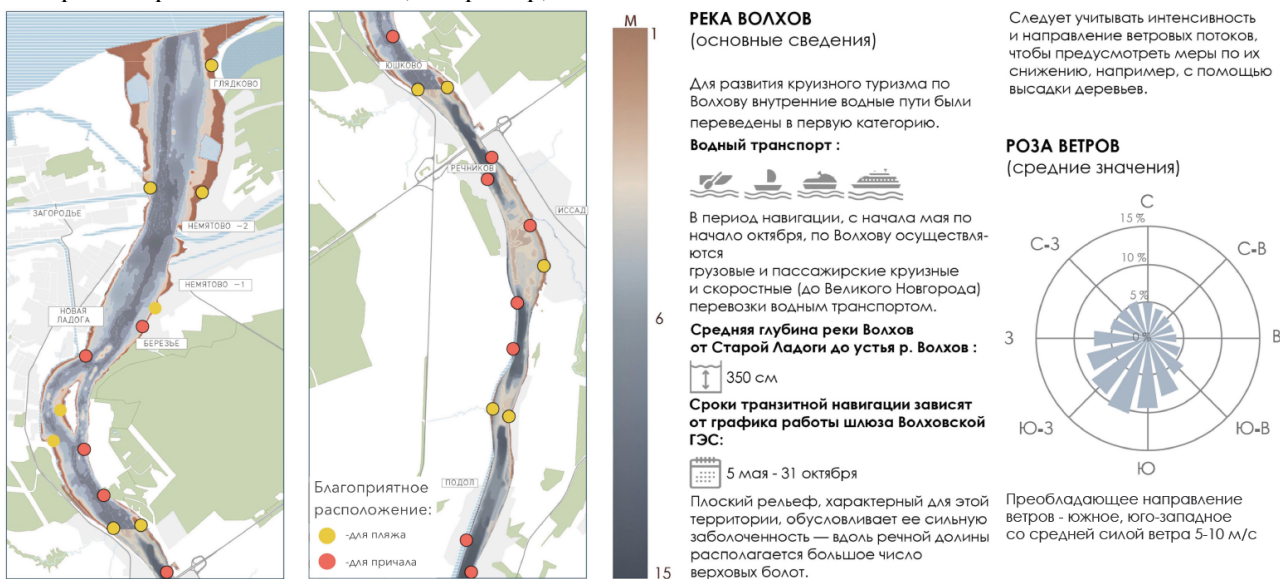


Рис.10. Карта глубин реки Волхов с выявлением территорий, благоприятных для размещения причалов и пляжей. Разраб. Грачева А. А.

находится памятник природы «Нижеволховский», который является ядром природного каркаса. Основным экологическим коридором выступает река Волхов. В настоящее время требуется очистка ее поверхностных вод, частичная регенерация прибрежных территорий. В реку Волхов впадает ряд малых рек, которые нуждаются в сохранении и поддержании их экологического состояния (рис. 11).

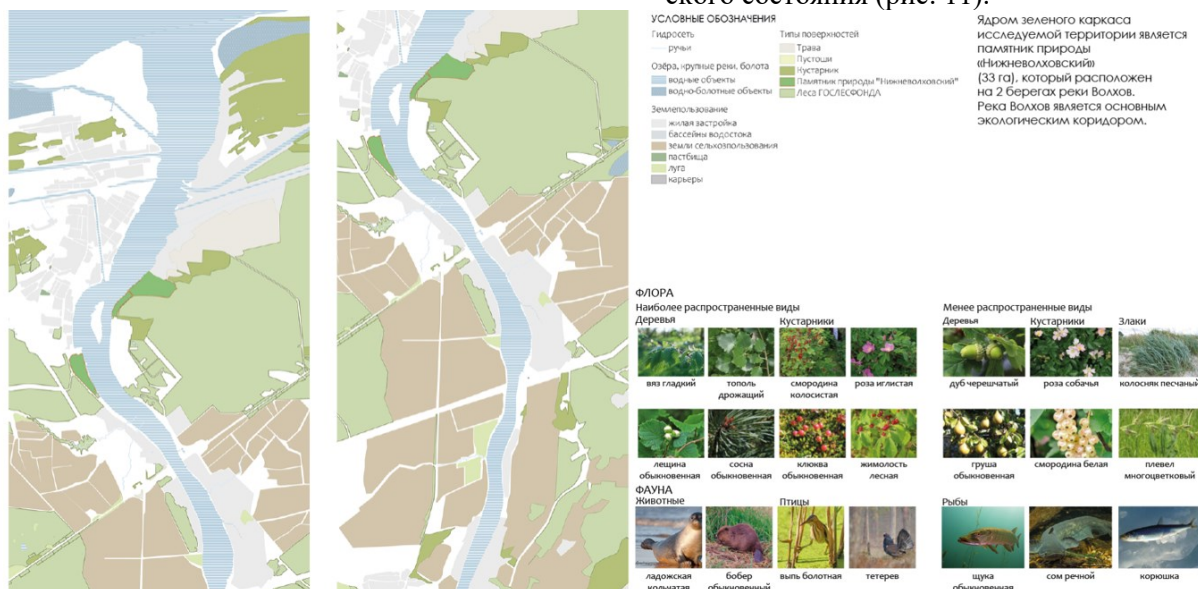


Рис. 11. Схема существующего зеленого каркаса рассматриваемой территории. Разраб. Грачева А.А.

выявил основные объекты культурного наследия: в Иссаде церковь Святой Троицы и церковь Мудрости Патриарха Иерусалимского; в Немайе Церковь Николая Чудотворца; Александровские маяки в Ново-Свирском канале. Схемы зон с особыми условиями использования территорий и правила землепользования и застройки представлены на рис. 12.

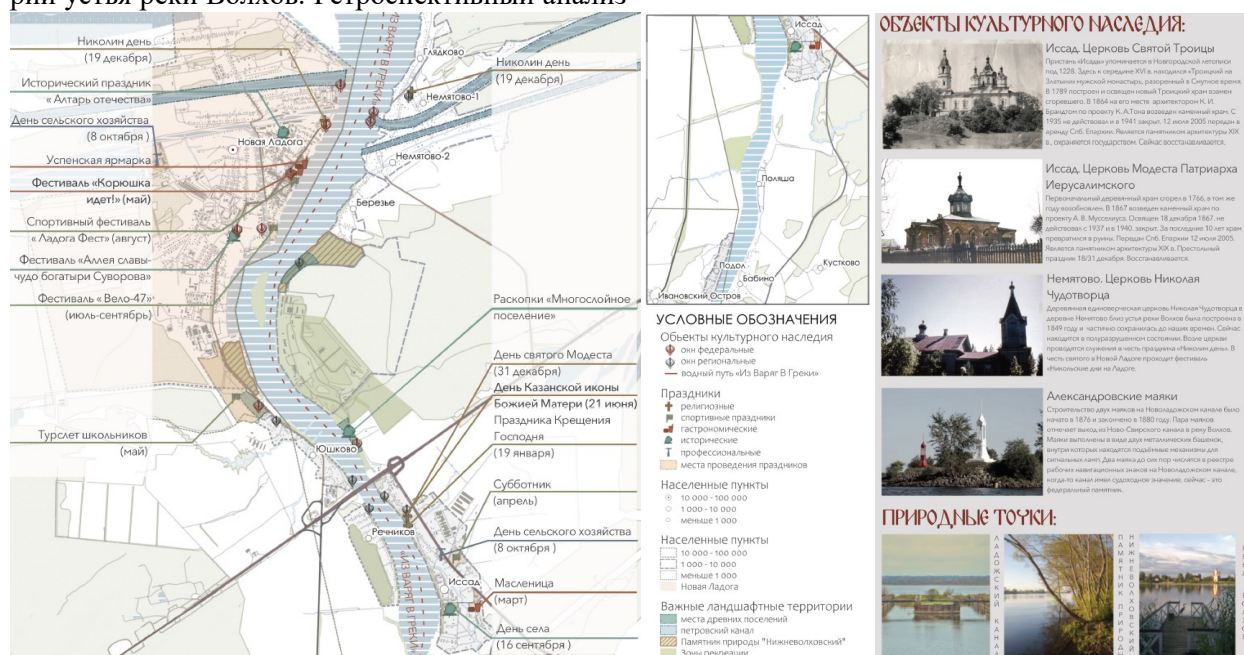


Рис. 12. Историко-культурный потенциал рассматриваемой территории
Разраб. Ладик Е.И., Грачева А.А.

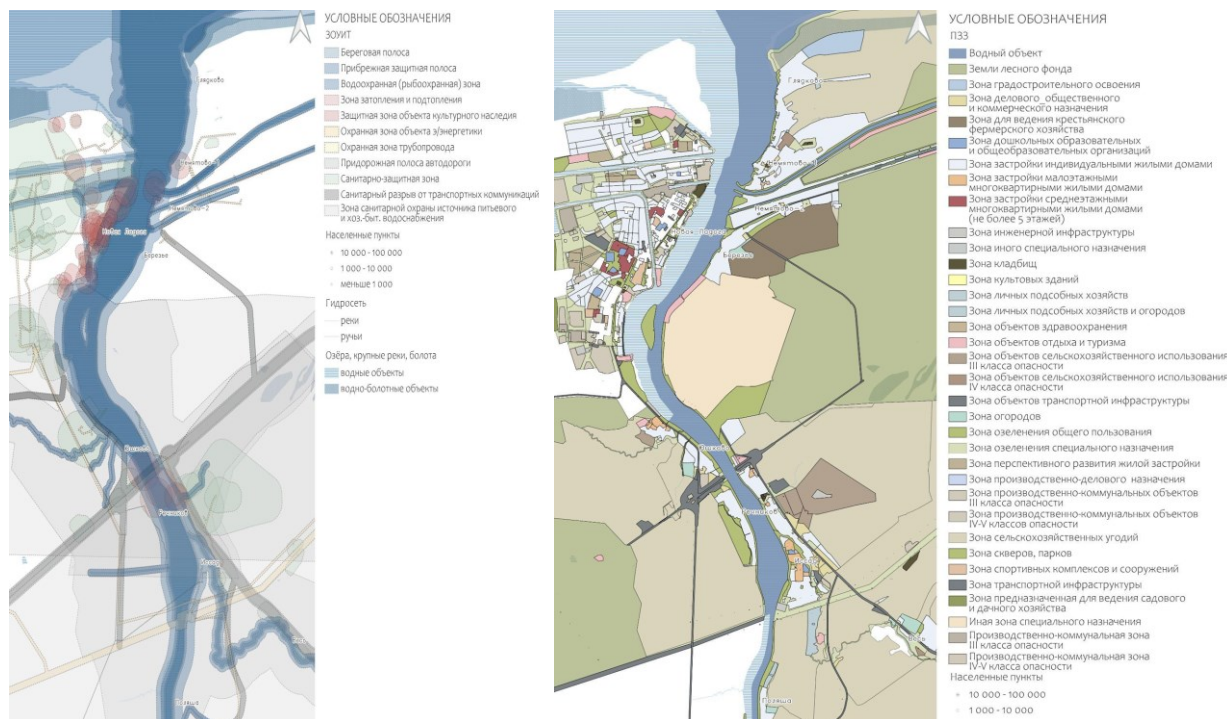


Рис. 12. Схемы зон с особыми условиями использования территории и ПЗЗ

Был проведён анализ этажности застройки в исторических поселениях. В основном на исследуемой территории представлена застройка в 1–

2 этажа. Исключение составляют бывшая военная база и деревня Иссад, на их территориях имеются 3-х этажные многоквартирные дома (рис.13).

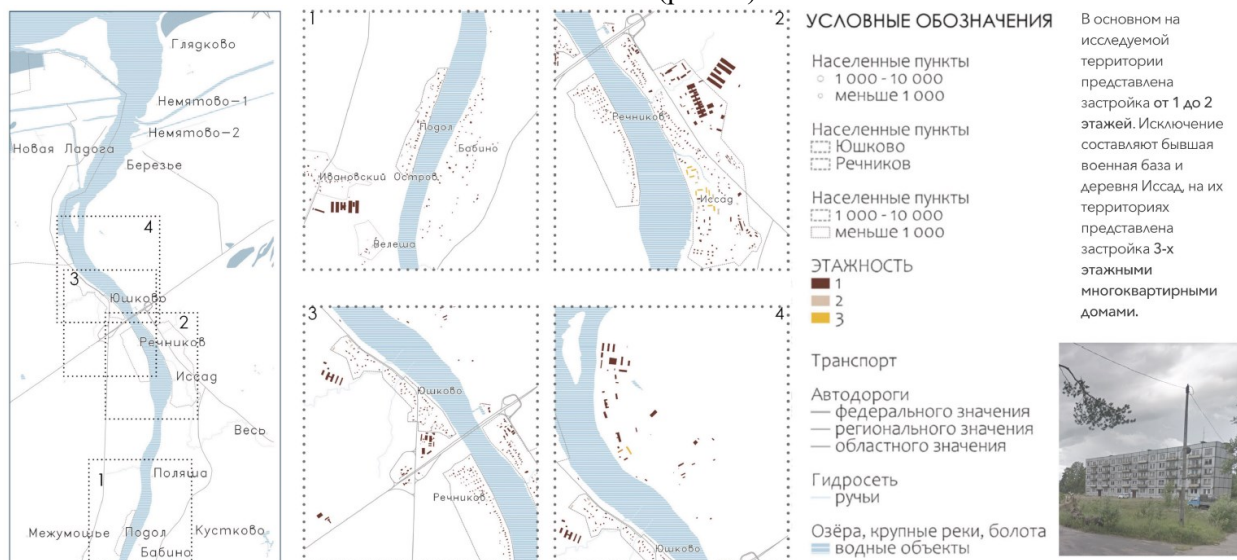


Рис. 13. Этажность застройки в исторических поселениях. Разраб. Грачева А.А., Кривобороденко В.А.

Предполагается градостроительное развитие поселений: в д. Глядково вдоль Ладожского озера; индивидуальное жилищное строительство (ИЖС) и строительство объектов социальной инфраструктуры на территории между Новосвирским и Старосвирским каналами; градостроительное развитие территории населенных пунктов д. Подол и п. Речников. В рамках градостроительного развития приречных территорий предлагается формирование туристско-рекреационных территорий на острове Ленина и на террито-

рии бывшей военной части, д. Иссад. Иссад рассматривается как важный опорный пункт регионального туризма. Транспортное расположение близ развязки с федеральной (Мурманское шоссе) и региональной (А-114) трассами, способствует размещению визит-центра и музейного комплекса. В центральном районе д. Иссад предлагается расположение событийных площадок для проведения национальных праздников. Одной из основных точек притяжения является храмовый ансамбль на берегу реки Волхов. Церковь Святого Модеста Иерусалимского предлагается

восстановить, так как храмовый комплекс является основной доминантой в структуре водного фасада поселения. Остров Ленина является ключевым объектом по пути следования по реке Волхов. Концепция градостроительного развития

предусматривает создание на острове мест отдыха. Систему доминант водного фасада исторических поселений предлагается дополнить созданием смотровой вышки на острове Ленина, с которой будут открываться панорамные виды на окрестности реки Волхов (рис. 14).

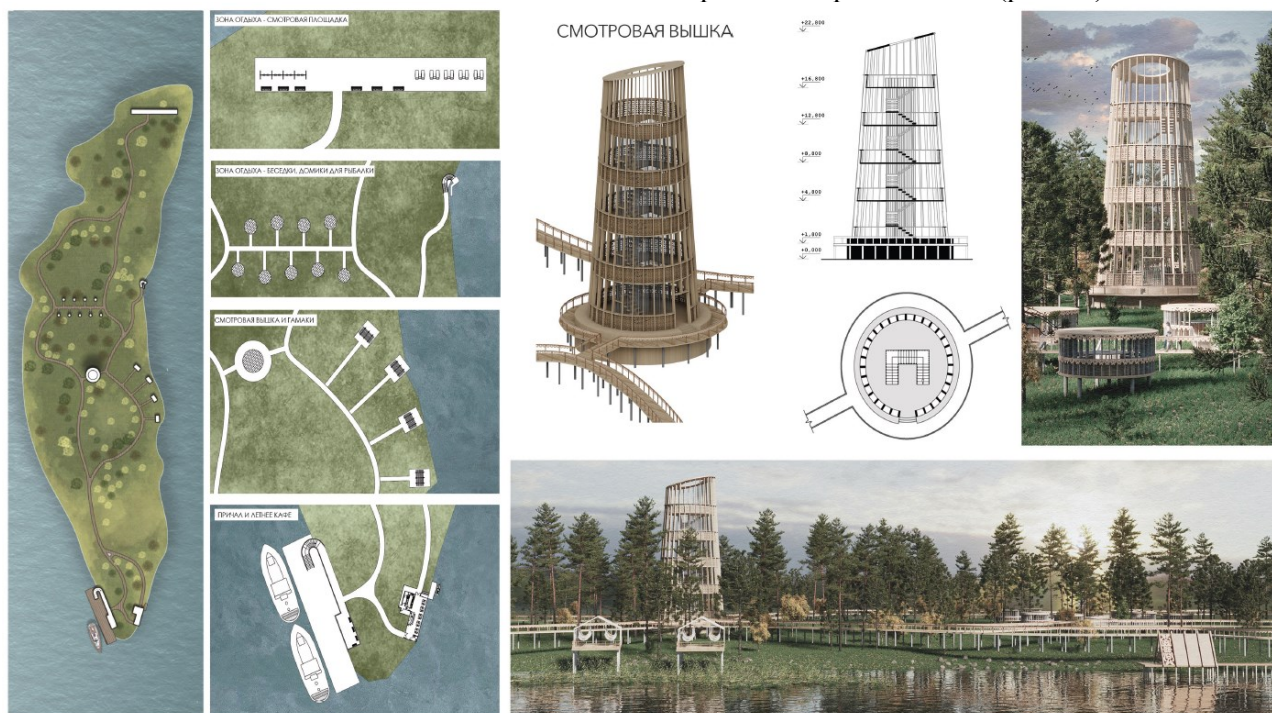


Рис. 14. Предложения по планировочной организации территории о. Ленина. Разраб. Ладик Е.И., Щапов Д.В.

Предлагается создание двух туристических маршрутов: познавательного и активного. Познавательный маршрут рассчитан на «пакетных» туристов в рамках тура «Старая Ладога – Новая Ладога». Активный рассчитан как самостоятельный. Сценарии туристических маршрутов функционируют как при посещении всего комплекса в целом, так и отдельных участков (рис.15). В основу развития туристических маршрутов положен исторический торговый путь «Из варяг в греки». Он включает в себя два кластера на межселенных территориях между двух поселений – деревня Подол в Староладожском сельском поселении и посёлка Речников в Иссадском сельском поселении Волховского района Ленинградской области. Деревня Речников является одной из основных остановок туристического маршрута. На территории острова Ленина предлагается размещение туристических причалов для теплоходов, моторных лодок и каяков, позволяя посетить остров всем категориям туристов. В качестве высотных доминант для формирования водного фасада предлагается возведение нескольких доминант, которые основаны на выявленной исторической идентичности территории.

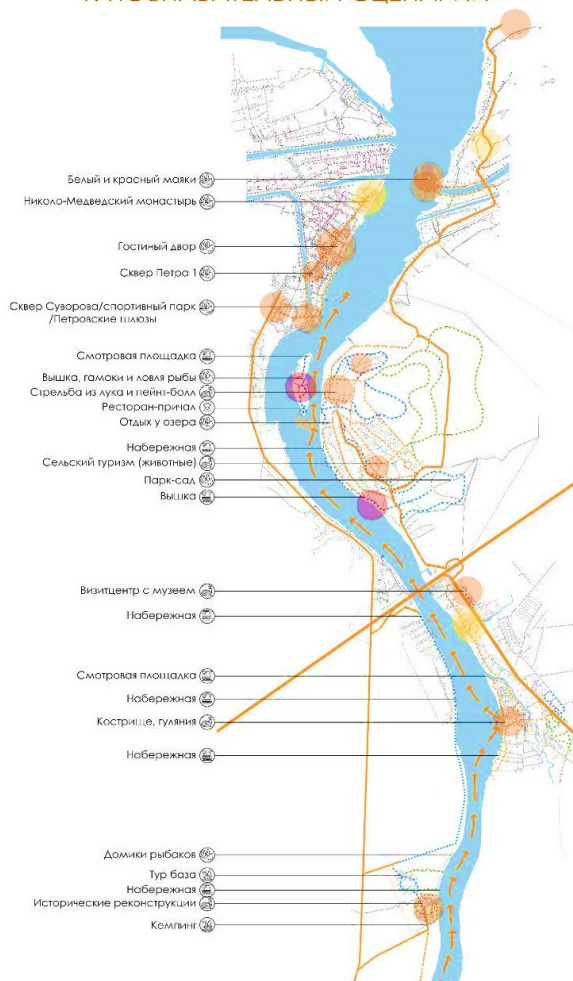
Туристический маршрут воссоздает исторический маршрут «Путь из варяг в греки», сочетая элементы русского зодчества и природный потенциал реки Волхов. Отправной точкой маршрута станет комплекс «Варяги», включающий

базу судостроения ладей и дракаров, где каждый сможет погрузиться в эпоху развития торгового пути и принять участие в создании реплики исторического корабля. Следующей точкой маршрута является туристический комплекс "Греки", сформированный на деградирующей территории бывшей военной базы, где предусмотрены пространства для проведения исторических реконструкций, сельского и этнографического туризма. На пути следования маршрута посещение острова Ленина, где запроектирована смотровая вышка с видовой площадкой, открывающей панорамы Новой Ладоги и природных пейзажей реки Волхов. На территории д. Иссад предусмотрено создание информационного визит-центра и развитие набережной. Предполагается, что туристический маршрут «Путь из варяг в греки» является своеобразным путешествием в прошлое, где каждый турист сможет прикоснуться к великой истории нашей Родины.

Выводы. Реки играли важную роль в пространственном развитии малых городов и поселений, служили основными коммуникационными артериями. На современном этапе наблюдается переосмысление роли приречных территорий, их функциональное насыщение и дальнейшее освоение. Основные особенности организации набережных в исторических поселениях включают: формирование водного фасада; ис-

пользование естественных ресурсов и уникальных особенностей местности; превращение приречных территорий в места социальной активности

1. ПОЗНАВАТЕЛЬНЫЙ СЦЕНАРИЙ



сти и интенсивной рекреации; проведение архитектурно-ландшафтной ревитализации и регенерации ландшафтов.

2. АКТИВНЫЙ СЦЕНАРИЙ

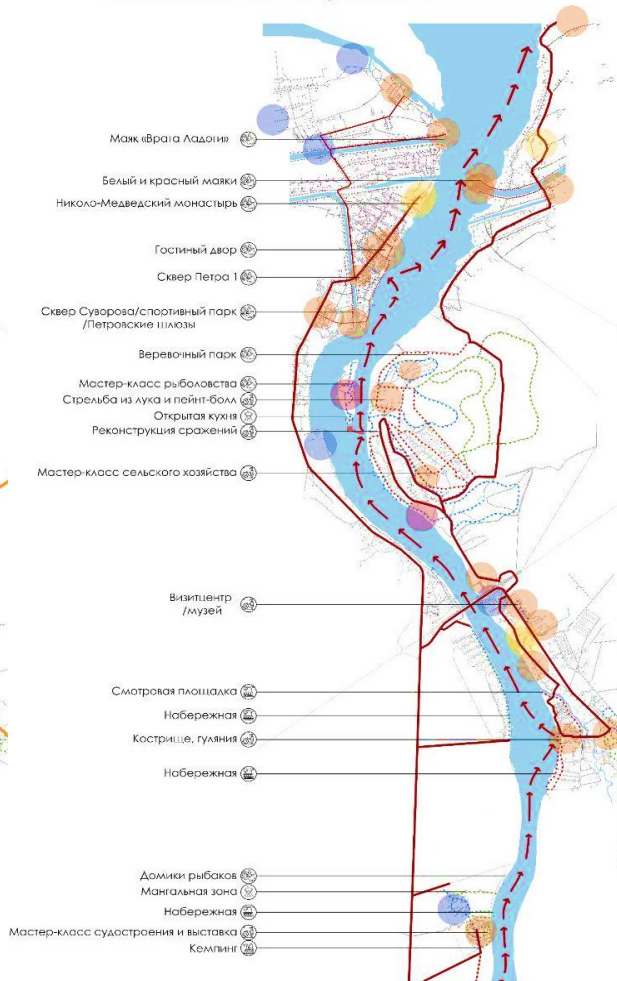


Рис. 15. Разработка туристических маршрутов (1- познавательный маршрут, 2- активный маршрут) приречных территорий в устье реки Волхов.

Сост. Пенькова М.В., Ладик Е.И., Кривобороденко В.А. Кожусь А.В.

Предложены принципы формирования водного фасада исторических поселений: 1) сохранение и восполнение визуальных горизонтальных и высотных доминант; 2) соблюдение баланса соотношения между застроенными территориями и открытыми озелененными пространствами; 3) проницаемость фронта застройки, формирование системы озелененных пешеходных улиц, бульваров, скверов, променадов; 4) формирование характерного для населенного пункта силуэта застройки; 5) регламентирование высотности застройки в зависимости от типа поселения; 6) сохранение композиционных осей и связей.

Выявлены перспективные направления градостроительного развития приречных территорий в исторических поселениях устья реки Волхов. Разработаны рекомендации по формированию водного фасада населенных пунктов устья реки Волхов в Ленинградской области с целью развития туристско-рекреационных территорий. Предлагается создание двух туристических

маршрутов: познавательного и активного. Познавательный маршрут рассчитан на «пакетных» туристов в рамках тура «Старая Ладога – Новая Ладога». Активный рассчитан как самостоятельный туризм. Сценарии туристических маршрутов функционируют как при посещении всего комплекса в целом, так и отдельных участков. В основу развития туристических маршрутов положен исторический торговый путь «Из варяг в греки» и включает в себя два кластера на межселенных территориях между двух поселений – деревня Подол в Староладожском сельском поселении и посёлка Речников в Иссадском сельском поселении Волховского района Ленинградской области. Результаты исследования могут быть использованы для разработки проектов планировки с целью развития приречных территорий для организации отдыха и туризма, сохранения и популяризации историко-культурного наследия страны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лутченко С.И. Территориально-планировочная организация туристской инфраструктуры Ленинградской области: дисс. на соиск. уч.ст. канд. арх. СПб: СПбГАСУ, 2023. 266 с.
2. Лутченко С.И. Формирование туристско-рекреационной зоны "Волховская" в Ленинградской области // Архитектура и современные информационные технологии. 2022. № 1(58). С. 161–173. DOI 10.24412/1998-4839-2022-1-161-173.
3. Горбань К.Е. Принципы композиционно-видовых связей (панорам) в понятии исторического поселения // Баландинские чтения. 2020. Т. 15. С. 445–453. DOI 10.24411/9999-001A-2020-10049.
4. Карпенко В.Е. Формирование световой панорамы прибрежного города (на примере Владивостока): автореф. дис. канд. арх. М.: МАРХИ, 2013. 208 с.
5. Дорошук Н.Р. Градостроительные особенности прибрежных территорий // International scientific review. 2016. №. 21 (31). С. 90–92
6. Арсентьева Ю.П. Правовые особенности градостроительного формирования жилой среды в прибрежных зонах поселений // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4(30). С. 99–108.
7. Кирпичников А.Н., Курбатов А.В. Новые данные о происхождении Ладожского поселения и о появлении славян в Поволжье // Stratum plus. Археология и культурная антропология. 2014. №. 5. С. 125–132.
8. Кривобороденко В. А. Особенности формирования водного фасада исторических поселений вдоль реки Волхов // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. С. 18–20
9. Перькова М.В. Пространственное развитие исторического города Новая Ладога Ленинградской области // Архитектура и строительство России. 2023. № 3(247). С. 56–59.
10. Сиченко Н.С. Культурологическая модель развития туризма Ленинградской области : автореф. дис. ... канд. культуролог. наук. СПб: Рос. гос. пед. ун-т им. А.И. Герцена, 2012. 23 с.
11. Гельфонд А.Л. Концепция формирования потенциальных пространственных каркасов исторических поселений // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 1. С. 26–34. DOI 10.22337/2077-9038-2019-1-26-34. EDN PBVNPJ.
12. Перькова М.В. Градостроительное развитие региональной системы расселения и ее элементов (на примере Белгородской области): автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора архитектуры специальность: 05.23.22 Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов. Санкт-Петербург, 2019. 40 с.
13. Михалчева С.Г. Градостроительный и ландшафтно-визуальный анализ: учеб. пособие по направлению подготовки 07.03.04 «Градостроительство». Пенза: ПГУАС, 2016. 120 с.
14. Вавулин К.Е., Малая Е.В. Концепция устойчивого развития малых исторических городов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2020. Т. 20, № 4. С. 5–12. DOI: 10.14529/build200401
15. Благовидова Н.Г., Юдина Н.В. Кластерный метод формирования устойчивых исторических поселений // Architecture and Modern Information Technologies. 2019. №4(49). С.183
16. Благовидова Н.Г., Волкова Н. А. Динамика городских доминант как основа устойчивого развития города // Электронный журнал "Architecture and Modern Information Technologies" («Архитектура и современные информационные технологии»). 2009. №. 4. С. 2.
17. Рыбаченко С.А., Лучкова В.И. Городские доминанты речного фасада Хабаровска // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. Тихоокеанский государственный университет, 2015. Т. 1. С. 275–282.

Информация об авторах

Перькова Маргарита Викторовна, доктор архитектуры, доцент, советник РААСН, директор Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Ладик Елена Игоревна, кандидат архитектуры, доцент Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Грачева Анастасия Александровна, магистрант Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: saschagrachev00@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Дребезгова Мария Юрьевна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила 23.02.2025 г.

© Перькова М.В., Ладик Е.И., Грачева А.А., Дребезгова М.Ю., 2025

Perkova M.V., *Ladik E.I., Gracheva A.A., Drebezgova M.Yu.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru*

FORMATION OF THE WATER FACADE OF SETTLEMENTS MOUTH OF THE VOLKHOV RIVER IN THE LENINGRAD REGION

Abstract. *In recent decades, more and more attention has been paid to the preservation of historical heritage and the development of the tourism potential of small towns and settlements in Russia. Small towns and settlements on the Volkhov River in the Leningrad Region are significant cultural heritage sites with high cultural and tourism potential. The article considers the features of formation of water facades within the boundaries of settlements located along the coastline of the Volkhov River mouth: Novaya Ladoga, Glyadkovo village, Nemyatovo village - 1, Nemyatovo village - 2, Berezye village, Yushkovo village, Rechnikov settlement, Issad village. In the course of the study, a retrospective and landscape-visual analysis of the territory was carried out. Historical vertical and horizontal dominants, lost objects that are valuable city-forming elements of the water facade of settlements, compositional and species connections and panoramas were identified. The composition and silhouette of the buildings, visibility pools were analyzed. The following principles of formation of the water facade of historical settlements are proposed: 1) preservation and replenishment of visual horizontal and high-rise dominants; 2) maintaining a balance in the relationship between built-up areas and open green spaces; 3) permeability of the development front, formation of a system of green pedestrian streets, boulevards, squares, promenades; 4) formation of a characteristic silhouette of the settlement; 5) regulation of the height of development depending on the type of settlement; 6) preservation of compositional axes and connections. Recommendations have been developed for the formation of the water facade of settlements at the mouth of the Volkhov River in the Leningrad Region for the purpose of developing tourist and recreational areas.*

Keywords: *water facade, riverine areas, historical and cultural potential, tourist routes, the Volkhov River*

REFERENCES

1. Lutchenko S.I. Territorial planning organization of the tourist infrastructure of the Leningrad region: diss. for PhD in arch. [Territorial'no-planirovochnaya organizatsiya turistskoj infrastruktury Leningradskoj oblasti]: diss. na soisk. uch.st. kand. arh.] St. Petersburg: SPbGASU, 2023. 266 p. (rus)
2. Lutchenko S.I. Formation of the tourist and recreational zone "Volkhovskaya" in the Leningrad region [Formirovanie turistsko-rekreacionnoj zony "Volkhovskaya" v Leningradskoj oblasti] Architecture and modern information technologies. 2022. No. 1 (58). Pp. 161–173. DOI 10.24412/1998-4839-2022-1-161-173 (rus)
3. Gorban K.E. Principles of compositional-species connections (panoramas) in the concept of a historical settlement [Principy kompozicionno-vidovyh svyazej (panoram) v ponyatii istoricheskogo poseleniya]. Balandin readings. 2020. Vol. 15. Pp. 445–453. DOI 10.24411/9999-001A-2020-10049 (rus)
4. Karpenko V.E. Formation of a light panorama of a coastal city (using Vladivostok as an example): author's abstract. diss. PhD in arch. [Formirovanie svetovoj panoramy pribrezhnogo goroda (na primere Vladivostoka): avtoref. dis. kand. arh.] Moscow: MARCHI, 2013. 208 p. (rus)
5. Doroshchuk N.R. Urban development features of coastal territories [Gradostroitel'nye osobennosti pribrezhnyh territorij] International scientific review. 2016. No. 21 (31). Pp. 90–92 (rus)
6. Arsenyeva, Yu. P. Legal features of urban development formation of the residential environment in coastal zones of settlements [Pravovye osobennosti gradostroitel'nogo formirovaniya zhiloy sredy v pribrezhnyh zonah poselenij] Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2014. No. 4(30). Pp. 99–108 (rus)
7. Kirpichnikov A.N., Kurbatov A.V. New data on the origin of the Ladoga settlement and the appearance of the Slavs in the Volkhov region [Novye dannye o proiskhozhdenii Ladozhskogo poseleniya i o poyavlenii slavyan v Povolhove] Stratum plus. Archaeology and cultural anthropology. 2014. No. 5. Pp. 125–132 (rus)

8. Krivoborodenko V.A. Features of the formation of the water facade of historical settlements along the Volkhov River [Osobennosti formirovaniya vodnogo fasada istoricheskikh poselenij vdol' reki Volhov] ISI Science Week: Collection of materials of the All-Russian conference, St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024. Pp. 18–20 (rus)

9. Perkova M. V. Spatial development of the historical city of Novaya Ladoga in the Leningrad region [Prostranstvennoe razvitie istoricheskogo goroda Novaya Ladoga Leningradskoj oblasti] Architecture and Construction of Russia. 2023. No. 3 (247). Pp. 56–59 (rus)

10. Sichenko N.S. Culturological model of tourism development in the Leningrad region: author's abstract. dis. ... PhD in cultural sciences [Kul'turologicheskaya model' razvitiya turizma Leningradskoj oblasti : avtoref. dis. ... kand. kud'turolog. nauk] St. Petersburg: Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, 2012. 23 p. (rus)

11. Gelfond A.L. The concept of formation of potential spatial frameworks of historical settlements [Konceptiya formirovaniya potencial'nykh prostranstvennykh karkasov istoricheskikh poselenij] Academy. Architecture and construction. 2019. No. 1. Pp. 26–34. DOI 10.22337/2077-9038-2019-1-26-34 (rus)

12. Perkova M.V. Urban development of the regional settlement system and its elements (on the example of the Belgorod region) [Gradostroitel'noe razvitie regional'noj sistemy rasseleniya i ee elementov (na primere Belgorodskoj oblasti)]: abstract

of the dissertation for the degree of Doctor of Architecture: specialty 05.23.22 Urban planning, planning of rural settlements. St. Petersburg, 2019. Pp. 40. (rus)

13. Mikhacheva, S.G. Urban planning and landscape-visual analysis [Gradostroitel'nyj i landshaftno-vizual'nyj analiz] textbook. Penza: PSUAS, 2016. 120 p. (rus)

14. Vavulin, K.E., Malaya E.V. The concept of sustainable development of small historical towns [Konceptiya ustojchivogo razvitiya malyh istoricheskikh gorodov] Bulletin of SUSU. Series "Construction and Architecture". 2020. Vol. 20, No. 4. Pp. 5–12. DOI: 10.14529/build200401 (rus)

15. Blagovidova, N.G., Yudina N.V. Cluster method for the formation of sustainable historical settlements [Klasternyj metod formirovaniya ustojchivyh istoricheskikh poselenij] Architecture and Modern Information Technologies. 2019. No. 4 (49). Pp. 183. (rus)

16. Blagovidova, N.G., Volkova N.A. Dynamics of urban dominants as a basis for sustainable development of the city [Dinamika gorodskih dominant kak osnova ustojchivogo razvitiya goroda] Electronic journal "Architecture and Modern Information Technologies". 2009. No. 4. P. 2. (rus)

17. Rybachenko S.A., Luchkova V.I. Urban dominants of the river facade of Khabarovsk [Gorodskie dominanty rechnogo fasada Habarovska] New ideas of the new century: materials of the international scientific conference of the FAD PNU. Pacific National University, 2015. Vol. 1. Pp. 275–282. (rus)

Information about the authors

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Professor. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia.

Ladik, Elena I. PhD, assistant professor. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Gracheva Anastasia A., graduate student E-mail: saschagrachev00@gmail.com. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Drebezgova, Mariya Y. PhD. E-mail mdrebezgova@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Received 23.02.2025

Для цитирования:

Перькова М.В., Ладик Е.И., Грачева А.А., Дребезгова М.Ю. Формирование водного фасада населенных пунктов устья реки Волхов в Ленинградской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 96–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-96-111

For citation:

Perkova M.V., Ladik E.I., Gracheva A.A., Drebezgova M.Yu. Formation of the water facade of settlements mouth of the Volkhov river in the Leningrad region. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 96–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-96-111

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-112-120

Дудина Е.И., Сыса О.К., Дороганов В.А., Локтионова Е.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: kate.dydina.31@yandex.ru*

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МАСС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ОБЛИЦОВКИ СТЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛИНЫ ЧИБИСОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация. В статье анализируются ключевые аспекты разработки новых керамических масс для производства облицовочной керамической плитки, в которых часть сырья заменяется на более доступные российские материалы. Реализация данной технологии способствует устранению дефицита качественного сырья, сокращению производственных затрат, при этом физико-механические характеристики либо улучшаются, либо остаются на прежнем уровне. Рассмотрена возможность использования глины Чибисовского месторождения и добавки мела для производства керамической плитки, предназначенной для внутренней облицовки стен. Проведен анализ основных физико-механических характеристик сырья. Для этого использовали метод рентгенофазового анализа. Определены физико-механические свойства керамических масс различных составов с помощью стандартных методов: определение водопоглощения, открытой пористости, и кажущейся плотности проводилось в вакуумметре, определение прочности на изгиб – на рычажных установках, оборудованных съёмными опорами методом трехточечного нагружения образца. Кроме того, были выявлены преимущества и недостатки замены глины Малоархангельского месторождения на чибисовскую, а также влияние увеличения содержания мела. Установлено, что замена малоархангельской глины на чибисовскую способствует улучшению процесса спекания, что, в свою очередь, положительно сказывается на показателях водопоглощения. Увеличение доли мела в составе улучшает качество спекания масс при неизменном показателе предела прочности.

Ключевые слова: облицовочная керамическая плитка, глина чибисовская, мел, полусухое формование, влажность, пресс-порошок, температура обжига.

Введение. Для промышленного и инновационного развития является значимым разработка новых составов керамических масс для производства облицовочной плитки, так как данный керамический продукт широко распространён в современном строительстве и интерьерном дизайне. Анализ различных материалов, добавок и технологий производства керамической плитки, а также их влияния на качество и характеристики конечного продукта позволит углубить понимание процессов керамического производства [1, 2].

В условиях глобализации производство керамической плитки для внутренней отделки стен зачастую осуществляется на предприятиях с одинаковыми мощностями с применением известных технологий, что приводит к схожим затратам на производство [3–4]. Кроме того, множество отечественных компаний в последнее время начали использовать иностранное сырьё в связи с истощением запасов высококачественного российского материала [5–6]. Приоритетным направлением исследований является создание составов керамических масс на основе отечественных сырьевых материалов, что позволит повысить технические, эксплуатационные, эстетические и потребительские характеристики изделий, а также

сократить их себестоимость. В связи с этим большинство исследований [7–10] сосредоточено на разработке новых составов путём замены компонентов на более доступные. Так же активно ведётся работа по внедрению в производство составов масс на базе белорусского сырья [10–12].

Для повышения качества продукции и уменьшения затрат рекомендуется использовать различные добавки и производственные отходы. Например, добавление фосфорного шлака, золы ТЭЦ и волластанита влияет на процесс спекания, способствует армированию и снижает водопоглощение [13]. Кроме того, применение горных пород из месторождений хромовых руд и платиновой минерализации позволяет уменьшить усадку в 20 раз и водопоглощение в 2,1 раза, не ухудшая механическую прочность [14]. Также введение различных добавок в исходные смеси положительно сказывается на интенсификации процесса спекания, так как эти добавки образуют низкоплавкие эвтектические смеси с основными компонентами и способствуют формированию жидкой фазы в системе при более низких температурах. Мел, будучи плавнем второго рода, образует с исходными компонентами легкоплавкие

эвтектические смеси, что способствует формированию жидкой фазы в системе при более низких температурах. [15, 16].

Также был разработан состав, включающий три вида глин с низкой температурой плавления. Одна из них является базовой, другая содержит CaO , а третья – SiO_2 . В результате технического решения была получена керамическая масса, на основе которой производятся облицовочные плитки, отличающиеся высокой механической прочностью, сниженной усадкой, водопоглощением и минимальной кривизной лицевой поверхности [17].

Рынок керамической плитки характеризуется постоянным и сильным ростом промышленного сектора, производящего такую продукцию. Фактически, этот рынок растет и увеличивает объемы производства в течение последнего десятилетия. По данным аналитического института, российский рынок керамической плитки явля-

ется одним из крупнейших в мире, его объем составляет примерно 2 млрд м^2 в год. Несмотря на экономические трудности развития страны, производственная мощность рынка увеличивается [18].

Цель настоящего исследования заключается в создании новых эффективных составов масс для производства керамической плитки, которые соответствуют высоким стандартам качества и долговечности. Эти составы должны быть легко контролируемы в процессе эксплуатации в производственных условиях и обладать оптимальными технологическими характеристиками.

Материалы и методы. Материалы. В данной работе в качестве сырьевых материалов использовались глина Малоархангельского месторождения (Орловская область), глина Чибисовского месторождения (Липецкая область), мел Воронежский, песок Карповский, шамот. Химический состав сырьевых компонентов приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав сырьевых компонентов

Наименование компонентов	Содержание оксидов, масс. %										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	SO_3	п.п.п	Σ
Глина малоархангельская	53,2	23,0	3,6	0,3	0,9	1,4	0,16	0,6	0,04	16,8	100
Глина чибисовская	60,5	25,2	2,5	0,27	0,8	1,9	0,27	0,96	–	7,6	100
Мел Воронежский	0,79	0,44	–	51,52	0,28	0,033	0,037	–	–	46,9	100
Песок Карповский	93,77	4,97	0,3	0,175	0,175	0,34	0,17	–	0,1	0	100
Шамот	64,55	20,35	2,749	8,219	0,825	1,485	1,115	0,647	0,06	0	100

В качестве альтернативы малоархангельской глине, применяемой на предприятии ООО «КЕРАМА МАРАЦЦИ», была рассмотрена глина Чибисовского месторождения. Химический состав этих глин схож, что подтверждает возможность их взаимной замены. Согласно данным рентгенофазового анализа, минералогический состав глин Малоархангельского месторождения в основном включает каолинит, иллит, кварц и полевой шпат, с небольшим количеством гематита. В свою очередь, глина Чибисовского месторождения по минералогическому составу является каолинит-гидрослюдистой, также присутствуют кварц, незначительные примеси ортоклаза и гематита. Сходство минералогического состава глин так же подтверждает возможность замены малоархангельской глины на чибисовскую.

В данной работе в качестве разжижителями керамических шликеров применялся триполифосфат натрия, представляющий собой наиболее распространенный дефлокулянт из группы полифосфатов и демонстрирующий заметный эффект разжижения. Анионы полифосфатов эффективно адсорбируются на глинистых частицах, что значительно увеличивает их отрицательный заряд. Это приводит к снижению вязкости керамической суспензии. Однако у триполифосфата натрия есть недостатки, включая его относительно высокую стоимость и процесс гидролиза при повышенных температурах в щелочной среде, который приводит к образованию ортофосфатов натрия. Это способствует росту вязкости суспензий со временем.

Методы. Химический состав сырьевых компонентов определялся рентгенофазовым анализом на установке УРС-50 со скоростью анализа 8 °С/мин.

В ходе подбора разжижителя была использована методика определения текучести шликера с помощью вискозиметра Энглера № 4.

Изменение линейных размеров измерялись на образцах-балочках размером 15 × 60 × 8 мм и плиточках с использованием классического метода определения воздушной, огневой и общей усадки. Размеры образцов измерялись с точностью до 0,01 см.

Определение водопоглощения, открытой пористости и кажущейся плотности проводилось с помощью вакуумной камеры, соединенной через электромагнитный клапан с вакуумметром и вакуумным насосом. Расчет кажущейся пористости, водопоглощения и открытой пористости производился по классическим формулам.

Определение прочности образцов при изгибе проводилось на сухих и обожженных балочках. Прочность при изгибе свежесформованных образцов определяли с помощью прибора Иванова. Для испытания обожженных керамических материалов на изгиб применялись рычажные

установки со съемными опорами, основанные на методе трехточечного нагружения образца.

Подготовка сырьевых материалов проводилась в лабораторных условиях по классической схеме производства керамической плитки из пресс-порошков с влажностью 6,5–7,1 %. Формование образцов толщиной 7 мм осуществлялось на гидравлическом прессе при удельном давлении 20 МПа. Обжиг образцов проводился при температурах 1050 °С, 1100 °С, 1150 °С, 1170 °С и 1200 °С.

Основная часть. При разработке масс на основе глины Чибисовского месторождения за основу был взят шихтовой состав, используемый на предприятии ООО «КЕРАМА МАРАЦЦИ» (состав №0 в табл.2).

Цель настоящего исследования заключалась в создании массовых составов для производства керамической плитки с использованием более доступного российского сырья. Основываясь на этом, содержание малоархангельской глины в исследуемых образцах уменьшалось от 64 % до 0,00 %, в то время как содержание чибисовской глины находилось в диапазоне от 20,83 % до 66,6 %. Доля кварцевого песка составила 13,54 %, мела – 10,42 %, а шамота – 9,4 % (табл. 2).

Таблица 2

Шихтовые составы исследуемых масс

Индекс массы	Содержание компонентов, % мас.				
	Глина малоархангельская	Глина чибисовская	Песок кварцевый	Мел	Шамот
0	64,00	—	15,00	10,00	11,00
I	45,83	20,83	13,54	10,42	9,4
II	25,00	42,00	13,54	10,42	9,4
III	0,00	66,60	13,54	10,42	9,4

Выбор подходящего типа и количества разжижителя (электролита) проводился при минимальной влажности плиточных шликеров и времени их истечения через вискозиметр Энглера равным одной минуте. Разжижитель подбирался с условием обеспечения протекания шликера через воронку вискозиметра Энглера № 4 в течение около 20 секунд.

В производстве компании ООО «КЕРАМА МАРАЦЦИ» применяется импортный дорогостоящий разжижитель FL 1125. В рамках данного исследования было проанализировано влияние триполифосфата натрия, жидкого стекла и полиакрилата натрия № 5. Разжижители добавлялись в шликер с шагом 0,01 % от общей сухой массы до достижения времени истечения от 20 до 25 секунд. При добавлении жидкого стекла и полиакрилата натрия № 5 не удалось достичь разжижения шликера; в обоих случаях наблюдалось его загустевание.

Введение триполифосфата натрия (ТПФН) обеспечило достижение требуемой консистенции и текучести шликера. Результаты исследования воздействия электролита на реологические свойства многокомпонентных плиточных шликеров приведены в таблице 3.

Из результатов эксперимента следует, что увеличение доли чибисовской глины в составе массы приводит к снижению влажности шликера, что, в свою очередь, способствует повышению качества как сырья, так и готовой продукции. Кроме того, наблюдается уменьшение объема, добавляемого разжижителя (ТПФН), что улучшает экономическую эффективность процесса.

Сравнение полученных результатов с исходным производственным составом показывает, что уровень влаги в шликере удалось снизить с 43,6 % до 35,3 %. Время истечения остается в пределах установленных заводских норм. Плотность шликера незначительно возросла.

Таблица 3

**Результаты исследования воздействия электролитов на реологические свойства
многокомпонентных шликеров**

Характеристики	№ состава			
	0	I	II	III
Количество триполифосфата натрия, %	5	5,12	4,28	3,83
Влажность практическая $W_{\text{практ.}}$, %	43,6	37,3	29,4	35,3
Время истечения, с	20,95	19	23,73	22,26
Плотность ρ , г/см ³	1,553	1,658	1,673	1,666

Таким образом установлена возможность замены дорогого импортного электролита FL 1125 на более бюджетный аналог – триполифосфат натрия.

Пресс-порошок был приготовлен шликерным способом, влажность его составляла 7 %. Образцы были обожжены в температурном диапазоне 1050–1200 °С. После обжига были определены водопоглощение, пористость, усадка, истинная плотность и предел прочности при изгибе

образцов. Также был оценен внешний вид полученных изделий. Результаты исследования представлены в таблице 4.

Цвет обожженных образцов имеет красновато-коричневый оттенок. Поверхность материала гладкая и ровная, без признаков пережога. Значительная деформация после обжига наблюдается только в образцах состава III (содержание глины чибисовской 66 %), обожженных при температуре 1200 °С.

Таблица 4

**Физико-механические характеристики образцов керамической плитки
на основе масс, содержащих чибисовскую глину**

Индекс массы	Водопоглощение, В, %					Предел прочности при изгибе, $\sigma_{\text{изг}}$, МПа				
	1050 °С	1100 °С	1150 °С	1170 °С	1200 °С	1050 °С	1100 °С	1150 °С	1170 °С	1200 °С
0	19,63	19,22	18,11	16,77	16,13	10,88	11,45	13,75	11,84	21,38
I	17,51	18,33	17,80	16,93	16,23	13,44	13,24	13,29	11,22	16,98
II	18,58	18,74	18,33	16,44	15,90	13,09	11,54	14,31	13,25	14,54
III	17,64	17,62	16,98	15,40	12,55	10,25	10,34	14,50	16,60	16,14

С увеличением доли чибисовской глины и, соответственно, снижением содержания малоархангельской глины при неизменном количестве других компонентов, наблюдается улучшение спекания масс и, в основном, снижение водопоглощения. Для образца III состава, в котором полностью заменена малоархангельская глина на чибисовскую, водопоглощение (16 %) соответствует требованиям ГОСТа 13996-2019 уже при температуре обжига 1150 °С. Для остальных образцов этот показатель достигает нормативов только при температуре 1200 °С.

Предел прочности образцов возрастает с повышением температуры, что в значительной степени обусловлено улучшением процесса спекания. Тем не менее, при увеличенном содержании глины Чибисовского месторождения при 1200 °С наблюдается снижение предела прочности, что обусловлено деформацией, возникающей в процессе обжига.

Таким образом на первом этапе исследований было установлена возможность полной замены в составе керамической плитки малоархангельской глины на чибисовскую. III состав, по показателям водопоглощения, достигает лучших показателей при температуре обжига 1170 °С и соответствует требованиям ГОСТ 13996-2019

для плиток группы ВIII (водопоглощение 10–20%), которую используют для внутренней облицовки стен. При этом температура обжига соответствует применяемой на предприятии ООО «Керама Марацци».

На втором этапе исследований, было принято решение о повышении в массах количества плавня второго рода - мела с целью улучшения спекания и снижения заводской температуры обжига. Шихтовой состав масс приведен в таблице 5.

Образцы обжигались в интервале температур 1050–1170 °С. Физико-механические характеристики исследованных образцов представлены в таблице 6.

Повышение содержания мела при постоянном количестве остальных компонентов способствует улучшению спекания массы. При увеличении температуры обжига наблюдается тенденция к снижению водопоглощения. Для состава с содержанием мела 12,42 % водопоглощение приближается к требуемым значениям (16 % по ГОСТу) уже при температуре 1050 °С, а при 1150 °С и 1170 °С достигает требуемых значений у всех составов. Признаки пережога наблюда-

ются у составов, содержащих максимальное количество мела при температуре 1100 °С и выше (рис. 1).

Предел прочности при изгибе возрастает с повышением температуры спекания и содержания мела, что обусловлено улучшенным процессом спекания.

Таблица 5

Шихтовые составы исследуемых масс второго этапа

Индекс массы	Содержание компонентов, % мас.			
	Глина чибисовская	Песок кварцевый	Мел	Шамот
IV	66,30	13,46	10,89	9,35
V	65,08	13,28	12,42	9,22
VI	63,52	13,02	14,42	9,04

Таблица 6

Физико-механические характеристики образцов керамической плитки на основе масс с повышенным содержанием мела

Индекс массы	Водопоглощение, В, %				Предел прочности при изгибе, $\sigma_{изг}$, МПа			
	1050 °С	1100 °С	1150 °С	1170 °С	1050 °С	1100 °С	1150 °С	1170 °С
IV	18,77	18,97	15,86	15,12	10,13	10,35	13,54	12,67
V	16,36	16,10	14,52	11,29	11,32	10,76	14,39	15,58
VI	19,27	18,33	14,11	6,95	14,48	12,53	17,72	17,84

Оттенок обожженных образцов варьировался от бежевого до красновато-коричневого. Поверхность большинства образцов характеризовалась гладкостью, но без признаков оплавления. Деформация после обжига наблюдалась у

образцов состава V (содержание мела 12,42%), полученных при температуре 1150 °С, а также у образцов состава VI (содержание мела 14,42%), подвергнутых термической обработке при температурах 1150 °С и 1170 °С (рис. 1).

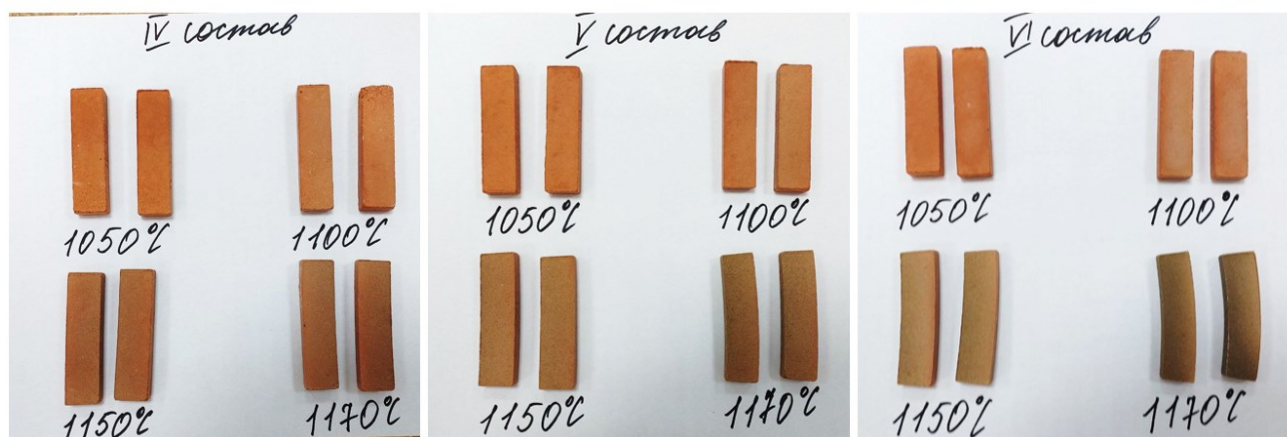


Рис. 1. Внешний вид образцов керамической плитки на основе глины Чибисовского месторождения с повышенным содержанием мела

Исследования показали, что состав V, содержащий 12,42 % мела, демонстрирует наилучшие показатели водопоглощения при обжиге при температурах 1050 °С и 1100 °С, соответствуя требованиям ГОСТа группе ВIII по ГОСТ (водопоглощение, % масс., $E > 10$) и может быть рекомендован для производства керамической плитки для внутренней облицовки стен.

Выводы. В ходе проведенных исследований установлена возможность полной замены малоархангельской глины на чибисовскую и увеличения количества мела в составе для изготовления керамической плитки для внутренней облицовки стен используемом на предприятии ООО «Ке-

рама Марацци», что позволяет расширить сырьевую базу производства при неизменной технологии.

Применение разработанного состава позволяет снизить температуру обжига с 1170–1190 °С (заводской) до 1050 °С, что ведет к значительной экономии энергетических ресурсов и является экономически выгодным.

Так же что увеличение доли чибисовской глины в составе массы приводит к снижению влажности плиточных шликеров, что, в свою очередь, способствует повышению качества как сырья, так и готовой продукции. Кроме того, уста-

новлена возможность применения менее дорогостоящего разжижителя триполифосфата натрия взамен импортного FL 1125.

Таким образом, определена перспективность использования в качестве сырьевых компонентов в производстве керамической плитки для внутренней облицовки стен местной легкоплавкой глины Чибисовского месторождения и добавки мела.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добужинский В.И., Белопольский, М.С., Рохваргер Е.Л. Новая технология керамических плиток. М: Стройиздат, 1977. 232 с.
2. Гурьева В. Проектирование производства изделий строительной керамики: учебное пособие. О: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2013. 179 с.
3. Канаев В.К. Новая технология строительной керамики. М.: Стройиздат, 1990. 264 с.
4. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988. 256 с.
5. Будников П.П. Химическая технология керамики. М.: Стройиздат, 1972. 453 с.
6. Справочник. Методическое пособие о керамической плитке [Электронный ресурс]. Завод керамический изделий. URL: <https://uralceramica.ru/info/56.html> (дата обращения: 13.10.2024).
7. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 240 с.
8. Сыса О.К., Сычева А.В., Омарова Л.А. Разработка состава массы керамической плитки для внутренней облицовки стен на основе глины большекарповского месторождения // Сб. докл. XI Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство». БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 200-206.
9. Калинина И.Е. Разработка составов масс для производства плитки керамической для внутренней облицовки стен на основе глин Шулеповского и Лукошкинского месторождений. // Студенческий клуб «Альтернатива». Сборник научных работ студентов России. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2006. С. 16–22.
10. Сергиевич О.А., Дятлова Е.М., Малиновский Г.Н., Баранцева С.Е., Попов Р.Ю. Исследование каолинов Белорусских месторождений с целью использования в производстве керамических плиток различного назначения // Труды БГТУ. 2013. № 3. С. 8–12.
11. Сыса О.К., Трепалина Ю.Н., Великанова А.Е., Яковлева М.А., Коробова Е.И. Керамическая плитка для внутренней облицовки стен на основе Новоорской глины // Сб. докл. XI Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство». БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 665–669.
12. Левицкий И.А. Керамические и стеклокристаллические материалы с использованием глауконитов Беларуси // Первый Евразийский горно-геологический форум. Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы геологии, геохимии и геофизики". Научно-производственный центр по геологии. 2016. С. 41–43.
13. Пат. 2635690, Российская Федерация, МПК C04B 33/04 (2006.01) C04B 33/132 (2006.01). Керамическая масса для изготовления облицовочной плитки /В.П. Ильина, В.В. Щипцов, П.В. Фролов; заявитель и патентообладатель Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук. № 2016112493; заявл. 01.04.2016; опубл. 15.11.2017 Бюл. № 32. 6 с.
14. Сагындыков А.А., Нурпеисов С.К., Жижина З.С., Омаралы Р.Н. Керамические плитки на основе суглинков и добавок // Механика и технологии. 2019. № 4. С. 149–156.
15. Сыса О.К. Морева И.Ю. Перетоккина Н.А. Иванов А.С. Бедина В.И. Трепалина Ю.Н. Гоголевская О.В. Особенности гидротермальной и бактериальной обработки глинистого сырья // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2013. № 6. С. 173–176.
16. Пат. 2189953, Российская Федерация, МПК C 04 B 33/00. Керамическая масса для изготовления облицовочных плиток /С.В. Афанасьев, В.Н. Махлай, Л.В. Зайцева, В.Д. Овчинников; заявитель и патентообладатель ЗАО «Корпорация Тольяттиазот». №2000127348/03; заявл. 01.11.2000; опубл. 27.09.2002. 6с.
17. Сыса О.К., Морева И.Ю., Трепалина А.А., Чепурных В.А., Локтионова Е.В., Локтионов В.А. Глинистое сырье для производства светлоокрашенного керамического кирпича в аспекте высокообразования солей ванадия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 12. С. 130–139.
18. Самородов И.В. Анализ рынка керамогранита и керамической плитки в Российской Федерации. У: ГОУ ВПО «Уфимский университет науки и технологий», 2022. 298 с.

Информация об авторах

Дудина Екатерина Игоревна, магистр кафедры технология стекла и керамики. E-mail: kate.dydina.31@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сыса Оксана Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: sysa1975@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Локтионова Екатерина Владимировна, аспирант кафедры промышленной экологии. E-mail: kate.sysa@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.11.2024 г.

© Дудина Е.И., Сыса О.К., Дороганов В.А., Локтионова Е.В., 2025

**Dudina K.I., Sysa O.K.,¹Doroganov V.A., Loktionova E.V.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
E-mail: kate.dydina.31@yandex.ru

DEVELOPMENT OF MASS COMPOSITIONS FOR THE PRODUCTION OF CERAMIC TILES FOR INTERIOR CLADDING OF WALLS USING CLAY FROM THE CHIBISOVSKOE DEPOSIT

Abstract. The article analyzes the key aspects of developing new ceramic masses for the production of facing ceramic tiles, in which some of the raw materials are replaced with more affordable Russian materials. The implementation of this technology helps to eliminate the shortage of high-quality raw materials, reduce production costs, while the physical and mechanical properties either improve or remain at the same level. The possibility of using clay from the Chibisovskoye deposit and chalk additives for the production of ceramic tiles intended for interior wall cladding is considered. The analysis of the main physical and mechanical properties of the raw materials was carried out. For this purpose, the X-ray phase analysis method was used. The physical and mechanical properties of ceramic masses of various compositions were determined using standard methods: water absorption, open porosity, and apparent density were determined in a vacuum gauge, bending strength was determined on lever installations equipped with removable supports using the three-point loading method of the sample. In addition, the advantages and disadvantages of replacing clay from the Maloarkhangelskoye deposit with Chibisovskaya, as well as the effect of increasing the chalk content, were identified. It has been established that replacing Maloarkhangelsk clay with Chibisov clay improves the sintering process, which in turn has a positive effect on water absorption. Increasing the proportion of chalk in the composition improves the quality of sintering of the masses with an unchanged tensile strength indicator.

Keywords: facing ceramic tiles, Chibisovskaya clay, semi-dry molding, humidity, press powder, firing temperature.

REFERENCES

1. Dobuzhinskij V.I., Belopol'skij M.S., Rohvarger E.L. New technology of ceramic tiles [Novaya tekhnologiya keramicheskikh plitok]. M.: Strojizdat, 1977. 232 p. (rus)
2. Gur'eva V. Designing the production of building ceramics: a textbook [Proektirovanie proizvodstva izdelij stroitel'noj keramiki: uchebnoe posobie]. O: Orenburgskij gosudarstvennyj universitet, EBS ASV, 2013. 179 p. (rus)
3. Kanaev V.K. New technology of building ceramics [Novaya tekhnologiya stroitel'noj keramiki]. M.: Strojizdat, 1990. 264 p. (rus)
4. Ur'ev N.B. Physico-chemical fundamentals of technology of dispersed systems and materials [Fiziko-himicheskie osnovy tekhnologii dispersnyh sistem i materialov]. M.: Himiya, 1988. 256 p. (rus)
5. Budnikov P.P. Chemical technology of ceramics [Himicheskaya tekhnologiya keramiki]. M.: Strojizdat, 1972. 453 p. (rus)
6. Guide. A methodological guide about ceramic tiles [Spravochnik Metodicheskoe posobie o keramicheskoy plitke]. Zavod keramicheskij izdelij. URL: <https://uralceramica.ru/info/56.html> (data obrashcheniya: 13.10.2024).

7. Pavlov V.F. Physico-chemical bases of firing of building ceramics products [Fiziko-himicheskie osnovy obzhiga izdelij stroitel'noj keramiki]. M.: Strojizdat, 1977. 240 p. (rus)

8. Sysa O.K., Sycheva A.V., Omarova L.A. Development of the composition of the mass of ceramic tiles for interior wall cladding based on clay from the Karpovsky deposit [Razrabotka sostava massy keramicheskoy plitki dlya vnutrennej oblicovki sten na osnove gliny bol'shekarpovskogo mestorozhdeniya]. Sb. dokl. XI Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum «Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo». BGTU im. V.G. Shuhova. 2019. Pp. 200–206. (rus)

9. Kalinia I.E. Development of mass compositions for the production of ceramic tiles for interior wall cladding based on clays from the Shulepovsky and Lukoshkin deposits [Razrabotka sostavov mass dlya proizvodstva plitki keramicheskoy dlya vnutrennej oblicovki sten na osnove glin Shulepovskogo i Lukoshkinskogo mestorozhdenij]. Studencheskij klub «Alternativa». Sbornik nauchnyh rabot studentov Rossii. BGTU im. V.G. Shuhova. 2006. Pp. 16–22. (rus)

10. Sergievich O.A., Dyatlova E.M., Malinovskij G.N., Baranceva S. E., Popov R.Yu. Investigation of kaolins from Belarusian deposits for use in the production of ceramic tiles for various purposes [Issledovanie kaolinov Belorusskikh mestorozhdenij s cel'yu ispol'zovaniya v proizvodstve keramicheskikh plitok razlichnogo naznacheniya]. Trudy BGTU. 2013. No 3 Pp. 8–12. (rus)

11. Sysa O.K., Trepalina Yu.N., Velikanova A.E., Yakovleva M.A., Korobova E.I. Ceramic tiles for interior wall cladding based on Novoorsk clay [Keramicheskaya plitka dlya vnutrennej oblicovki sten na osnove Novoorskoy gliny]. Sb. dokl. XI Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum «Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo». BGTU im. V.G. Shuhova. 2017. Pp. 665–669. (rus)

12. Levickij I.A. Ceramic and glass-crystalline materials using glauconites of Belarus [Keramicheskie i steklokristallicheskie materialy s ispol'zovaniem glaukonitov Belarusi]. Pervyj Evrazijskij gorno-geologicheskij forum. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya "Aktual'nye problemy geologii, geohimii i geofiziki". Nauchno-proizvodstvennyj centr po geologii. 2016. Pp. 41–43. (rus)

13. Pat. 2635690, Rossijskaya Federaciya, MPK C04B 33/04 (2006.01) C04B 33/132 (2006.01). Ceramic mass for the manufacture of facing tiles. [Keramicheskaya massa dlya izgotovleniya oblicovочноj plitki]. V.P. Il'ina, V.V. Shchipcov, P.V. Frolov; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe Gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut geologii Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. No 2016112493; zayavl. 01.04.2016; opubl. 15.11.2017 Byul. No 32. 6 p. (rus)

14. Sagyndykov A.A., Nurpeisov S.K., Zhizhina Z.S., Omaraly R.N. Ceramic tiles based on loams and additives [Keramicheskie plitki na osnove suglinkov i dobavok]. Mehanika i Tehnologii. 2019. No 4. Pp. 149–156. (rus)

15. Sysa O.K., Moreva I.Yu., Peretokina N.A., Ivanov A.S., Bedina, V.I., Trepalina Yu.N., Gogolevskaya O.V. Features of hydrothermal and bacterial treatment of clay raw materials [Osobennosti gidrotermal'noj i bakterial'noj obrabotki glinistogo syr'ya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No 6. Pp. 173–176. (rus)

16. Pat. 2189953, Rossijskaya Federaciya, MPK C 04 B 33/00. Ceramic mass for the manufacture of facing tiles [Keramicheskaya massa dlya izgotovleniya oblicovочnyh plitok] /S.V. Afanas'ev, V.N. Mahlaj, L.V. Zajceva, V.D. Ovchinnikov; zayavitel' i patentoobladatel' ZAO «Korporaciya Tol'yattiazot». No 2000127348/03; zayavl. 01.11.2000; opubl. 27.09.2002. 6 p. (rus)

17. Sysa O.K., Moreva I.Yu., Trepalina A.A., Chepurnyh V.A., Loktionova E.V., Loktionov V.A. Clay raw materials for the production of light-colored ceramic bricks in the aspect of salinization of vanadium salts [Glinistoe syr'e dlya proizvodstva svetlookrashennogo keramicheskogo kirpicha v aspekte vysoloobrazovaniya solej vanadiya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No 12. Pp. 130–139. (rus)

18. Samorodov I.V. Analysis of the market of porcelain stoneware and ceramic tiles in the Russian Federation [Analiz rynka keramogranita i keramicheskoy plitki v Rossijskoj Federacii]. U: GOU VPO «Ufimskij universitet nauki i tekhnologii», 2022. 298 p. (rus)

Information about the authors

Dudina, Kate I. Master of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: tdmtrieva-bel@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sysa Oksana, K. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: sysa1975@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Doroganov, Vladimir A. Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Loktionova, Kate V. Postgraduate student of the Department of Industrial Ecology. E-mail: kate.sysa@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 20.11.2024

Для цитирования:

Дудина Е.И., Сыса О.К., Дороганов В.А., Локтионова Е.В. Разработка составов масс для производства керамической плитки для внутренней облицовки стен с использованием глины Чибисовского месторождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-112-120

For citation:

Dudina K.I., Sysa O.K., Doroganov V.A., Loktionova E.V. Development of mass compositions for the production of ceramic tiles for interior cladding of walls using clay from the Chibisovskoe deposit. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-112-120

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-121-132

Баранов Д.С., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., Дуганов В.Я., Латышев С.С.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,***E-mail: den-3218@yandex.ru*

ПРОБЛЕМА ПРОИЗВОДСТВА КРУТОИЗОГНУТЫХ ОТВОДОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. В статье приведено описание крутоизогнутого отвода, его назначение, технические характеристики и параметры, влияющие на эксплуатационные свойства. Рассмотрены распространенные виды отводов и способы их изготовления. Произведен краткий анализ способов изготовления. Определен оптимальный способ изготовления крутоизогнутых отводов, коим является горячая протяжка по рогообразному сердечнику ввиду высокой производительности и при минимальных отходах материала.

Описана сущность способа горячей протяжки по рогообразному сердечнику, приведена схема процесса изготовления отвода крутоизогнутого. Приведена обобщенная схема конструкции рогообразного сердечника, состоящего из хвостовика, направляющей, переходной, деформирующей и калибрующей частей.

Обозначена проблема предприятия, возникающая в процессе изготовления отводов крутоизогнутых из жаропрочной стали и приводящая к преждевременному выходу оснастки из строя. Предварительно определены возможные факторы, влияющие на процесс формообразования, к которым относятся: материал заготовки и сердечника, температурно-силовые режимы, конструкция и геометрия сердечника. Сформулированы задачи, комплексное решение которых может способствовать устранению проблемы.

Для частичного решения задачи определения оптимальной конструкции и геометрии рогообразного сердечника был произведен патентный анализ существующей оснастки, прототипов и полезных моделей, приведено краткое описание.

Ключевые слова: рогообразный сердечник, крутоизогнутый отвод, горячая протяжка, жаропрочные стали, стойкость оснастки

Введение. Изготовление продукции, не уступающей импортной, является приоритетным направлением в рамках индустриально-инновационной политики импортозамещения. В соответствии с поручением президента от 30 марта 2024 года № Пр-616, п.1 и) к 2030 году необходимо увеличить производство высокотехнологичных товаров, созданных на основе собственных линий разработки [1]. Для успешного решения задач этого направления необходим научно-обоснованный подход, а именно: использование актуальных методов математического и твердотельного моделирования, CAE-анализа [2–4].

К одной из таких задач относится производство соединительных элементов трубопровода, а именно, крутоизогнутых отводов. В соответствии с действующими государственными и отраслевыми стандартами, техническими условиями отвод – это бесшовное или сварное изделие в виде изогнутой на заданный угол и с заданным радиусом трубы. Основным предназначением отводов является перенаправление потока газообразных, жидких или твердых сыпучих веществ в трубопроводах [5]. Наиболее широкое применение крутоизогнутые отводы нашли в крупных от-

раслях промышленности: нефтегазовой, аэрокосмической, химической, энергетической, а также в коммунальной сфере и быту.

Процесс подготовки производства отводов напрямую зависит от проведения научно-исследовательских и опытно-экспериментальных работ, по результатам которых можно определить основные факторы, степень их влияния, а также предложить рекомендации по оптимизации. Такая необходимость связана с тем, что прогнозирование поведения материала заготовки под действием приложенных сил и возникающих в процессе формообразования нагрузок является сложной задачей [6].

Производство отводов позволяет получать изделия в соответствии с требуемыми параметрами [7, 8], варьирующимися в зависимости от:

- транспортируемой разного рода среды – газа, жидкости, мазута, кислоты, густой и жидкой смазки;
- условного давления перекачиваемого продукта – ниже атмосферного - вакуум, без избыточного давления, низкого – до 10 МПа, высокого – выше 10 МПа;

- рабочей температуры – холодной считается ниже нуля, нормальной – до 50 °С и горячей – свыше 50 °С;

- используемого материала - стали (углеродистой, легированной, высоколегированной), цветных металлов и сплавов (медных, латунных, титановых, свинцовых алюминиевых), чугуна и неметаллических материалов (полиэтилена, поливинилхлорида, фторопласта, стекла);

- территориального признака – внутрицеховые и межцеховые.

В зависимости от способа изготовления отводы делятся на штамповарные, сварные секционные (секторные), точеные, гнутые и крутоизогнутые бесшовные.

Отводы стальные штамповарные изготавливают путем штамповки из листовой стали с последующей сваркой сопрягаемых поверхностей одним или двумя продольными швами [9]. Для отводов с диаметром условного прохода $D_y \geq 1200$ дополнительно рекомендуется использовать поперечный шов.

В соответствии с ОСТ 36-20-77 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода $D_y 600 - 1400$ мм, радиусомгиба $R = 1.5D_y$ под углом 30, 45, 60 и 90°. Из условий ОСТ 36-19-77 допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -30°С до 300 °С. Условное давление не должно превышать $P_y \leq 2.5$ МПа (≈ 25 кгс/см²), что соответствует низкому.

Такой способ применим для изготовления малоответственных изделий, т.к. прочность сварного шва, как правило, ниже прочности основного материала детали.

Сварные секционные отводы изготавливают путем сварки вальцованных листов или секторов сложного лекального раскроя. Как правило, заготовки вырезают на станке газоплазменной резки с ЧПУ. Вальцовка осуществляется на четырехвалковой листогибочной машине [10].

В соответствии с ОСТ 36-21-77 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода $D_y 500 - 1400$ мм, радиусомгиба $R = 1.5D_y$ под углом 30, 45, 60 и 90°. Из условий ОСТ 36-19-77 допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -30°С до 300 °С. Т.к. все сварные швы изделий тщательно контролируются методами радиационной, ультразвуковой, магнитной или электромагнитной дефектоскопии, такие отводы при соблюдении эксплуатационных условий выдерживают низкое условное давление $P_y \leq 2.5$ МПа (≈ 25 кгс/см²).

Способ изготовления таких отводов является наименее затратным относительно всех остальных способов.

Точеные отводы изготавливают из литой заготовки квадратной формы на промышленном токарном оборудовании высокой точности [11].

В соответствии с ГОСТ 22820-83 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода $D_y 6 - 200$ мм, под углом 45 и 90°. Допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -50°С до 510 °С. Условное давление в диапазоне $10 \leq P_y \leq 100$ МПа (≈ 1020 кгс/см²), что соответствует высокому. Для таких отводов характерны: высокая прочность, износостойкость и устойчивость к воздействию агрессивных сред.

Способ изготовления таких отводов является наиболее время- и трудозатратным относительно всех остальных способов, а коэффициент использования материала может достигать до 0,2, т.е. до 80% металла в процессе обработки отходит в стружку.

Гнутые отводы изготавливают способом холодной гибки, в документации обозначаются как ГО (холодноизогнутый) по ГОСТ 24950-2019 или способом горячего гнутья, т.е. с разогревом зоны деформации трубы-заготовки, в документации обозначаются как ОГ (горячедеформированный) [12].

При производстве холодноизогнутого отвода используются специализированные установки для гибки труб. Полость заготовок может быть заполнена сыпучим материалом, что позволит нагрузке равномерно распределяться по стенкам в зоне деформации, в таком случае по краям монтируются заглушки.

Горячедеформированные отводы получают в процессе разогрева заготовки в месте деформации индукционным способом или газозвушной горелкой. В процессе контролируются такие параметры как: подача нагревательного элемента, радиус изгиба, объем подачи охлаждающей жидкости и прочие. После этого обрезаются и разделяются под приварку кромки, производится контроль толщины стенки в зоне изгиба с наружной и внутренней стороны.

В соответствии с ГОСТ 24950-2019 могут быть изготовлены отводы наружного диаметра $D_n 57 - 1420$ мм включительно, радиусомгиба $R = 1.5D_y$ под углом не более 90°. Допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от -50 °С до 510 °С. Условное давление в диапазоне $10 \leq P_y \leq 100$ МПа (≈ 1020 кгс/см²), что соответствует высокому. Такой способ применим для изготовления ответственных изделий, а отсутствие сварных швов позволяет использовать отводы с толщиной

стенки меньшей на 15–20 %, чем у штамповарных и сварных отводов.

Отводы крутоизогнутые бесшовные изготавливаются методом штамповки или протяжки по рогаобразному сердечнику. В соответствии с ГОСТ 17235-2001 могут быть изготовлены отводы с диаметром условного прохода D_y 15 – 1000 мм, радиусомгиба $R = 1D_y$ под углом 30, 45, 60, 90 и 180° (Рис. 1 1). Из условий ГОСТ 17380-2001 допустимая рабочая температура стенки отвода должна находиться в диапазоне от

–70 °С до 450 °С. Условное давление не должно превышать $P_y \leq 16$ МПа (≈ 163 кгс/см²), что соответствует высокому. Данный способ наиболее производительный и экономичный, т.к. коэффициент использования материала может доходить до 1, т.е. при изготовлении практически не остается отходов [13, 14]. Помимо всего прочего данный способ позволяет изготавливать отводы с относительным радиусомгиба 1–1,5 и относительной толщиной стенки 0,025–0,05.

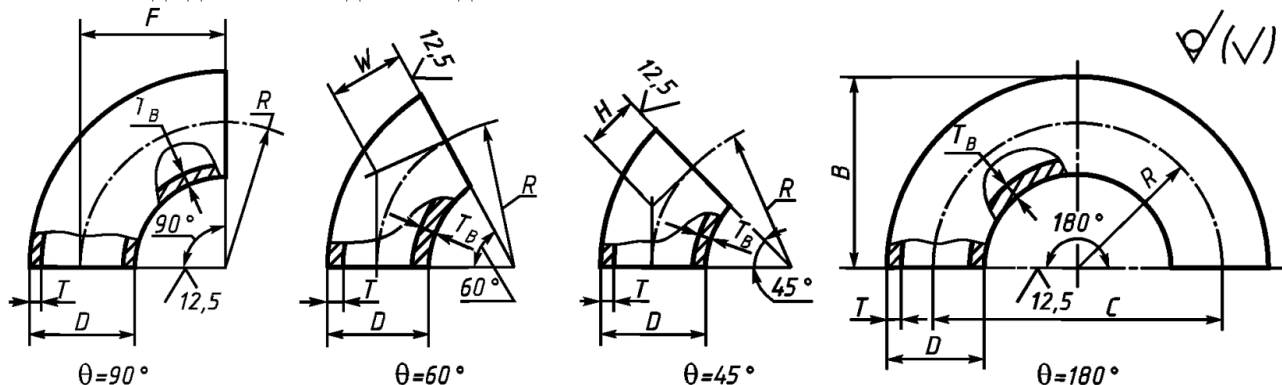


Рис. 1. Отводы крутоизогнутые бесшовные по ГОСТ 17375-2001

Сущность способа протяжки по рогаобразному сердечнику заключается в нагреве трубы-заготовки 1 с помощью индуктора 2 до температуры пластической деформации и одновременном с этим скольжении благодаря графитовой смазке по рогаобразному сердечнику 3 (рис. 2). Перемещение с заданным усилием P и скоростью

обеспечивается подающим механизмом прессы 4 [15, 16]. Из этого следует, что на процесс формообразования могут оказывать влияние следующие факторы: материал заготовки и сердечника, температурно-силовые режимы, конструкция и геометрия сердечника.

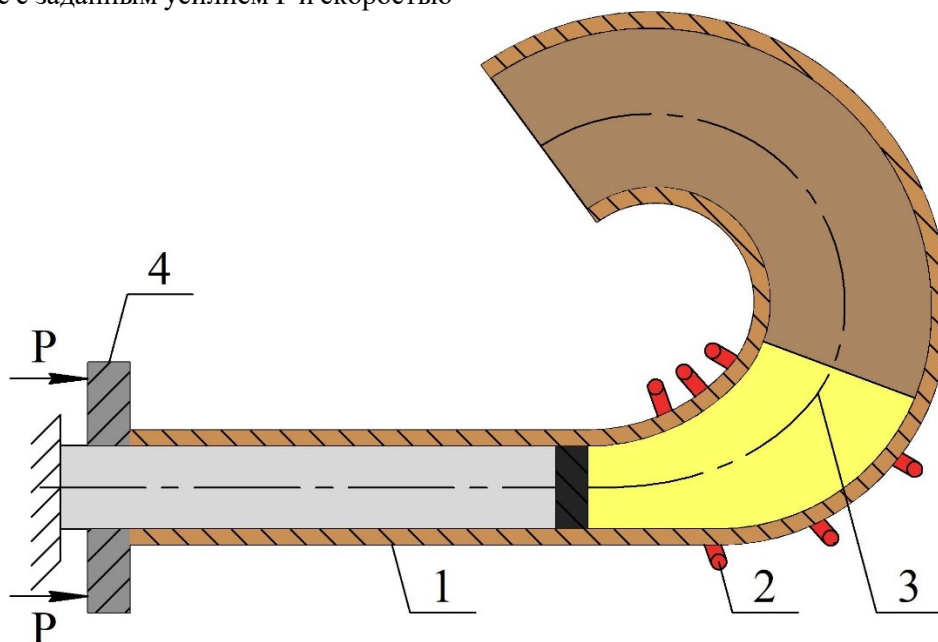


Рис. 2. Схема протяжки по рогаобразному сердечнику

Способ горячей протяжки по рогаобразному сердечнику в настоящее время внедряется в производственных условиях на предприятии ООО

«Белэнергомаш – БЗЭМ» (рис. 3) для изготовления отводов крутоизогнутых $\varnothing 57 \times 5$ мм из труб марки 08X18H10T по ТУ 14-3Р-197-2001 на уста-

новке УПО-100. Эти отводы используются в трубопроводах котлов атомных электростанций. В качестве оснастки применяется рогообразный

сердечник, выполненный из жаропрочной стали марки 1X14H75Ю5ТЗЛ в соответствии с ТУ 1-812-0055-81.



Рис. 3. Процесс горячей протяжки

Методика. Проблема заключается в том, что в процессе изготовления крутоизогнутых отводов из жаропрочной стали марки 08X18H10T происходит разрыв сердечника, как правило, в начале деформирующей зоны.

Для определения основных причин были проведены эксперименты.

Из труб $\varnothing 45 \times 6$ марки 08X18H10T и стали 20 производилась протяжка отводов $\varnothing 57 \times 5$ по рогообразному сердечнику из жаропрочной стали 1X14H75Ю5ТЗЛ. Использовалась оснастка от нескольких поставщиков.

При протяжке заготовки из аустенитной стали произошел разрыв сердечника №1 через 50 мм от начала деформирующей зоны (рис. 4). Давление пресса в момент разрыва составило 40–45 атм, температура нагрева заготовки была в районе 1000–1060 °С, скорость протяжки колебалась от 8 до 9 мм/с.

Сердечник №2 повел себя аналогичным образом: при заходе заготовки из аустенитной стали на калибрующую часть, произошел разрыв оснастки в начале деформирующей части. В момент разрыва давление пресса достигло 40 атм, а температура нагрева заготовки не превышала 950 °С.

Процесс формообразования отвода из углеродистой стали прошел стабильно при давлении пресса 30–40 атм и температуре нагрева заготовки 900–950 °С.

Во время осмотра вышедшей из строя оснастки были обнаружены многочисленные трещины на цилиндрической и деформирующей частях сердечника, вероятно, являющиеся концентраторами напряжения, вследствие чего мог произойти разрыв.



Рис. 4. Разрыв сердечника

Проблема разрыва сердечника может быть устранена решением комплекса задач:

- Определения оптимального материала сердечника;
- Нахождения оптимальной конструкции и геометрии сердечника при заданных условиях;
- Определения оптимальных температурно-силовых режимов.

В соответствии с этими задачами необходимо определить механические и технологические свойства материала, обеспечивающие требуемые режимы формообразования. А также провести сравнительный анализ возможных вариантов подобранных материалов для работы в условиях рассматриваемого технологического процесса. При этом наиболее целесообразным будет использование методов имитационного моделирования напряженно-деформированных состояний конструкций сердечника из различных материалов.

Для решения задачи нахождения оптимальной конструкции и геометрических параметров сердечника необходимо выполнить анализ конструкций, методик расчетов их геометрических параметров на основе патентных исследований и литературного обзора в том числе справочных и научно-технических источников.

Для определения оптимальных силовых и температурных режимов, реализуемых в ходе процесса формообразования необходимо провести анализ фактических температур в зоне формообразования. Особенность процесса является необходимость периодической дозагрузки заго-

товок в подающее устройство с прерыванием рабочей подачи. В связи с этим требуется анализ изменений температур в различных участках в зоне деформирования, которые проявляются в силу инертности процесса нагрева заготовок.

Основная часть.

Известно, что глубина прогрева аустенитных сталей в холодном и горячем состоянии отличается незначительно [17], из этого следует, что рогообразный сердечник при протяжке заготовок из аустенитной стали нагревается в большей степени (с поверхностных слоев к центру), т.к. отсутствует температурный перепад между заготовкой и оснасткой, это приводит к значительному сокращению стойкости оснастки.

Существуют сердечники разной конструкции и геометрии [1818], в первом приближении – это изогнутый стержень (рис. 5), состоящий из следующих частей:

1. Хвостовик предназначен для крепления к штанге, по которой подаются заготовки к сердечнику;
2. Направляющая часть является продолжением штанги;
3. Переходная часть служит для правильного позиционирования заготовки при наталкивании на сердечник;
4. Деформирующая (формообразующая) часть предназначена для постепенного придания заготовке основной геометрии и размеров будущего отвода;
5. Калибрующая часть необходима для придания отводу правильной (спиралевидной) и точной формы.



Рис. 5. Обобщённая схема рогообразного сердечника

В процессе патентного анализа были обозначены работы, посвященные вопросам геометрии сердечника. Так для устранения эллипсности, спиральности геометрической оси, утяжки переднего конца и повышенного расхода материала было предложено формообразующую часть разделить на три зоны: предварительной деформации, окончания деформации и калибрующей, что позволит улучшить качество получаемых отводов и снизить расход металла на 8–15 % [19].

Проблема искажения формы отвода ввиду повышенного усилия протяжки затрагивается в работе [20]. Исправление формы можно достиг-

нуть выполнением наружной образующей сердечника по дуге, сопрягаемой с дугой на участке за рабочим профилем, эквидистантной внутренней дуги на том же участке.

Для повышения качества получаемых отводов калибрующую часть можно выполнить сечениями разных диаметров, при этом диаметр калибрующей части, прилегающей к формообразующей, выполнен большим диаметра другого участка [21].

Тот же эффект можно достичь выполнением калибрующей части с переменным по форме сечением, круглым на стыке с деформирующей ча-

стью и постепенно переходящим в овал с сохранением периметра по всей длине и расположением оси овала в плоскости изгиба сердечника. При этом меньшая ось овала не должна превышать внутреннего диаметра готового отвода [22].

В случае отхода заготовки от поверхности сердечника, происходит искажение формы концов отвода. В работе [23] деформирующую часть предложено выполнить по синусоидальному закону (1), что обеспечит плавные соединения между переходной, деформирующей и калибрующей частями сердечника.

$$\Delta d = \frac{D_0 - d_0}{2} \left[\sin \pi \cdot \left(\frac{l}{L} - \frac{1}{2} \right) + 1 \right] \quad (1)$$

Похожий результат можно получить благодаря приданию формы эллипса деформирующей

части [24], причем наибольшая разница между полуосями эллипса определяется соотношением (2):

$$\frac{D - d_0}{4} \leq b - a \leq 2 \cdot \frac{D - d_0}{3} \quad (2)$$

Цель получения равнонапряженных отводов может быть достигнута изменением формы деформирующей части сердечника 3, выполненной в виде симметричного овала, который очерчен с выпуклой и вогнутой сторон двумя окружностями разных радиусов (Рис. 6). Радиусы плавно увеличиваются от начала до конца участка. К окружностям проведены две касательные прямые. Окружность большего радиуса располагается на вогнутой части участка [25].

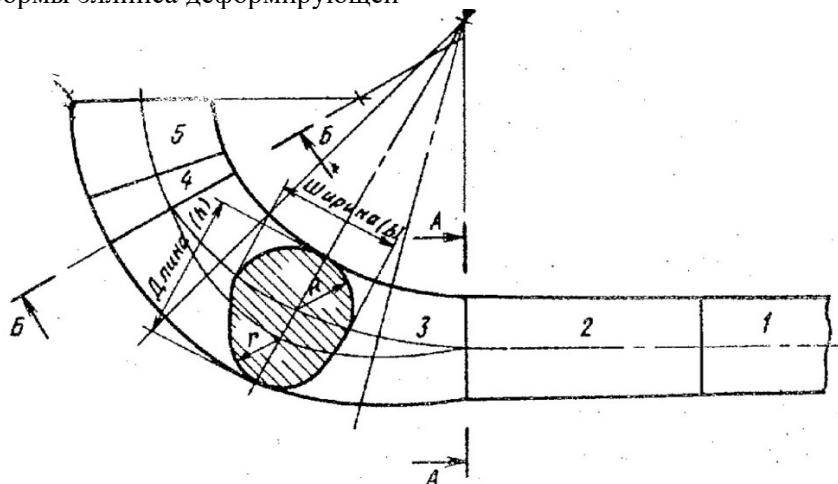


Рис. 6. Деформирующая часть сердечника в виде симметричного овала

Повышение прочности сердечника возможно за счет увеличения жесткости на изгиб участка, имеющего наименьший момент сопротивления изгибу в круглом сечении W_k и овальном W_o :

$$W_k = 0,1 \times d^3 \quad (3)$$

$$W_o = \frac{b \times h^2}{6} \quad (4)$$

Конструктивным особенностям сердечника, посвящены следующие работы. Так для повышения жесткости полого сердечника [26] продольную полость рекомендуется выполнить с поперечным сечением в виде эллипса, большая ось которого расположена в плоскости симметрии сердечника [27]. Замкнутая полость заполнена средой, передающей давление (вода или пар). При нагреве в замкнутой полости за счет парообразования создается давление, величина которого регулируется настройкой предохранительного клапана. Причем для большей жесткости продольную полость для подачи жидкости можно сместить относительно оси [28, 28]. Принципиально отличающаяся конструкция представлена в работах [29–32].

Тот же эффект достигается выполнением деформирующей части сердечника с выступами по внешней образующей [33], скругленными по радиусам на половине периметра поперечного сечения и впадинами, причем размеры выступов и впадин определяются по зависимостям (5–7):

$$H_i = \frac{A_i}{20} \quad (5)$$

$$R_i = \frac{D_i}{2} \quad (6)$$

$$r = (0,3 - 0,5) \cdot D_i \quad (7)$$

Получение отводов требуемого качества без необходимости в объемной правке можно достичь выполнением стабилизирующего участка в виде части тора, ограниченного углом не менее 90° с диаметром сечения, как у калибрующего участка. Такая конструкция позволяет увеличить производительность процесса горячей протяжки и повысить качество отводов благодаря снятию внутренних напряжений в материале отвода [34]. Тот же эффект можно достичь выполнением дополнительного калибрующего участка [35].

Для возможности гибки труб на малые радиусы без потери устойчивости стенки заготовки на

вогнутой стороне сердечника необходимо выполнить паз, в котором установлена система вращающихся роликов, центр кривизны образующих которых совпадает с центром кривизны поперечных сечений сердечника, проходящих через оси вращения роликов [36].

Получение отводов разного радиусагиба или диаметра возможно при использовании модульных конструкций: дополнительного формоизменяющего (деформирующего) участка в виде съемной секторной части тора с радиусомгиба отвода [37] или в виде съемной втулки направляющего участка [38].

Образование задигов и рисок на внутренней части отводов вследствие налипания металла трубы на рабочую поверхность калибрующей части сердечника можно предотвратить. Для этого предложено использовать съемную калибрующую часть, выполненную из материала с низкой магнитной проницаемостью (12X18H10T или ВНЛ-3) [39].

Повышенные технологические усилия, пониженный срок службы пресса, невозможность изготовления тонкостенных отводов возможно устранить путем выполнения восьми симметричных относительно плоскостигиба канавок вдоль всей формоизменяющей (деформирующей) и в начале калибрующей частей сердечника [40]. Такая конструкция приводит к уменьшению площади контакта на 40–50 %. Выполнение канавок винтовой формы предложено для устранения формирования продольных выступов, копирующих канавки формоизменяющего (деформирующего) участка [41].

Выводы

1. Проведен анализ основных способов изготовления крутоизогнутых отводов, определен оптимальный вариант, коим является горячая протяжка по роغوобразному сердечнику.

2. Проведен анализ способа горячей протяжки и схемы процесса формообразования отвода крутоизогнутого. Выдвинуто предположение, что такие факторы как: материал заготовки и сердечника, температурно-силовые режимы, конструкция и геометрия сердечника, могут оказывать влияние на процесс формообразования.

3. Проведен анализ проблемы предприятия, из-за которой оснастка, применяемая для изготовления крутоизогнутых отводов из жаропрочной стали, преждевременно выходит из строя. Сформулирован комплекс задач, решение которых может привести к устранению проблемы.

4. Выполнен краткий анализ конструкций, методик расчетов их геометрических параметров на основе патентных исследований и литературного обзора в том числе справочных и научно-технических источников.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поручения президента // Президент России URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/73759#assignment-8> (дата обращения: 02.10.2024).
2. Халевицкий Ю.В., Коновалов А.В. Методы решения СЛАУ в конечно-элементных программных комплексах, моделирующих деформации твёрдых тел // Фундаментальные исследования. 2015. № 8–2. С. 338–344.
3. Тимофеев С.П., Гринек А.В., Хуртасенко А.В., Бойчук И.П. Технология механической обработки, цифровое моделирование и реализация устройства для контроля формы крупногабаритных деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 2. С. 6–24. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24.
4. Хуртасенко В.А., Шрубченко А.В. Математическая модель для оптимизации параметров обработки поверхностей качения технологических агрегатов мобильным оборудованием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 144–150. DOI 10.34031/article_5cb1e65b635e41.79569989
5. Марьин Б.Н., Иванов Ю.Л., Макаров К.А., Муравьев В.И., Одинокое В.И. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем ЛА. М.: Машиностроение, 1998. 400 с.
6. Марьин Б.Н., Феоктистов С.И., Колыхалов Д.Г., Куриный В.В., Иванов И.Н. Исследование совмещенных процессов при изготовлении деталей летательных аппаратов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. Т.1, № 2(26). С. 34–41.
7. Тавастшерна Р.И. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов. М.: Стройиздат, 1986. 286 с.
8. Братухин, А.Г. Иванов Ю.Л. Современные технологии авиастроения: учебное пособие. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.
9. Отводы штамповарные // ПКФ URL: <https://www.metelement.ru/catalog/otvody/shtampo-svarnye-otvody/> (дата обращения: 02.10.2024).
10. Отводы секционные сварные // РЕММАШГРУПП URL: <https://remmg.ru/service/otvody-sekcionnye-svarnye/> (дата обращения: 02.10.2024).
11. Отводы точеные (угольники) // Серебряный мир 2000 URL:

<https://www.sm2000.ru/katalog-detaley-truboprovodov/detali-truboprovodov/otvodi/otvoditochenie-ugolyniki> (дата обращения: 02.10.2024).

12. Гнутые отводы - все что нужно знать // Авангард URL: <https://www.polycoat.ru/about/articles/gnutye-otvody-vse-chto-nuzhno-znat.html> (дата обращения: 02.10.2024).

13. Гальперин А.И. Машины и оборудование для гнутья труб. М.: МАШГИЗ, 1963. 156 с.

14. Шувалов, Ю.Б. Горячая протяжка круто-изогнутых отводов на полых рогообразных сердечниках // Химическое и нефтяное машиностроение. 1991. № 2. С. 36-37.

15. Альбов И.Н. Гнутье труб с индукционным нагревом // Кузнечно-штамповочное производство. 1963. № 4. С. 21-27.

16. Феоктистов С.И., Марьин Б.Н., Марьин С.Б., Колыхалов Д.Г. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. 88 с.

17. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

18. Макаров К.А., Марьин Б.Н., Петров А.М. Исследование процесса тибки-раздачи трубных заготовок по рогообразному сердечнику с нагревом // Кузнечно-штамповочное производство. 1992. №5. С. 4-6.

19. А. с. 165640, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / А.С. Витенберг, В.Е. Леонтович; В.Е. Леонтович. № 748582/25-8; заявл. 18.10.1961; опубл. 12.10.1964, Бюл. № 3. 2 с.

20. А. с. 172262, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник / А.С. Витенберг, Г.А. Грозин; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 750771/25-27; заявл. 30.10.1961; опубл. 29.06.1965, Бюл. № 13. 2 с.

21. А. с. 515550, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / А.Д. Игнатьев; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 1784595; заявл. 16.05.1972; опубл. 30.05.1976, Бюл. № 20. 2 с.

22. А. с. 904836, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник / Н.М. Белкин, В.С. Толстых; заявитель и патентообладатель ново-сине-глазовский комбинат строительных конструкций. № 2825180; заявл. 08.10.1973; опубл. 15.02.1982, Бюл. № 6. 2 с.

23. А. с. 995980, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник / В.А. Соловейчик; заявитель и патентообладатель всесоюзный научно-исследовательский институт по монтажным и

специальным строительным работам. № 2956079; заявл. 11.07.1980; опубл. 15.02.1983, Бюл. № 6. 4 с.

24. А. с. 1391770, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник / Ю.Б. Шувалов, В.А. Куренков, Р.И. Тавастшерна, Е.Г. Колеватов, И.Л. Рева; заявитель и патентообладатель всесоюзный научно-исследовательский институт по монтажным и специальным строительным работам. № 4122021; заявл. 26.06.1986; опубл. 30.04.1988, Бюл. № 16. 3 с.

25. А. с. 963611, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник / В.И. Назаров, С.В. Баранов, В.Д. Нохрин, А.А. Шатров, А.М. Кабуренков; заявитель и патентообладатель челябинский филиал специального проектно-конструкторского бюро "проектнефтегазспецмонтаж" министерства строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности СССР, новосине-глазовский комбинат строительных конструкций. № 3284389; заявл. 07.05.1981; опубл. 07.10.1982, Бюл. № 37. 3 с.

26. А. с. 871890, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник / Г.П. Ким, Ю. И. Рубенчик, А. Х. Акмухаметов, О.Ф. Фролов, Р.М. Фельдман; заявитель и патентообладатель всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт технологии химического и нефтяного аппаратостроения. № 2849993; заявл. 13.12.1979; опубл. 15.10.1981, Бюл. № 38. 3 с.

27. А. с. 564906, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник / А.В. Слезовский; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 2002768; заявл. 11.13.1974; опубл. 15.07.1977, Бюл. № 26. 2 с.

28. А. с. 515551, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / А.В. Слезовский; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 2023610; заявл. 13.05.1974; опубл. 30.05.1976, Бюл. № 20. 2 с.

29. А. с. 880560, СССР, МПК В21D 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / В.И. Павлов, Ю.С. Сури, В.А. Куренков, Р.И. Тавастшерна; заявитель и патентообладатель специальное конструкторское бюро всесоюзного научно-исследовательского института по монтажным и специальным строительным работам. № 2895322; заявл. 18.03.1980; опубл. 15.11.1981, Бюл. № 42. 3 с.

30. А. с. 856615, СССР, МПК В21D 9/12. Полый рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / В.А. Куренков, Р.И. Тавастшерна, Ю.С. Летников, И.Л. Рева; заявитель и патентообладатель всесоюзный

научно-исследовательский институт по монтажным и специальным строительным работам. № 2689472; заявл. 29.11.1978; опубл. 23.08.1981, Бюл. № 31. 3 с.

31.А. с. 584931, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник / М.А. Гаскель, И.Г. Шехриладзе; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 2384471; заявл. 07.07.1969; опубл. 25.12.1977, Бюл. № 47. 3 с.

32.А. с. 631237, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник для гибки труб / В.Л. Гудков, Ю.С. Летников, В.П. Абросов, А.П. Уфимцев; заявитель и патентообладатель всесоюзный государственный проектно-конструкторский институт по индустриализации монтажных работ "гипромонтажиндустрия". № 2469089; заявл. 30.03.1977; опубл. 05.11.1978, Бюл. № 41. 2 с.

33.А. с. 1224042, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник / Б. Н. Марьин, заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873. № 3658718; заявл. 12.09.1983; опубл. 15.04.1986, Бюл. № 14. 2 с.

34.А. с. 566649, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления из трубных заготовок отводов с центральным углом не более 90° / А.М. Киямов; заявитель и патентообладатель строительно-монтажная сварочная лаборатория треста "востокметаллургмонтаж". № 2047654; заявл. 29.07.1974; опубл. 30.07.1977, Бюл. № 28. 2 с.

35.А. с. 642047, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник / В.И. Голенкин, А.В. Соков, В.И., Ваулин, П.А. Лазарев, А.П. Уфимцев; заявитель и патентообладатель уральский завод монтажных изделий. № 2495517; заявл. 06.06.1977; опубл. 15.01.1979, Бюл. № 2. 2 с.

36.А. с. 698695, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления крутоизогнутых патрубков / М.Н. Горбунов, В.И. Ер-

шов, М.Ф. Каширин, М.В. Кондратьев, В.А. Понцев; заявитель и патентообладатель Московский авиационный технологический институт им. К.Э. Циолковского. № 2622476; заявл. 02.06.1978; опубл. 25.11.1979, Бюл. № 43. 2 с.

37.А. с. 741988, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / Б.Н. Марьин; заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873. № 2715377; заявл. 22.01.1979; опубл. 25.06.1980, Бюл. № 23. 3 с.

38.А. с. 863069, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / Б.Н. Марьин; заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873. № 2829538; заявл. 19.10.1979; опубл. 15.09.1981, Бюл. № 34. 3 с.

39.А. с. 1061882, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов из трубных заготовок / Б.Н. Марьин, В.Ф. Баженов, П.В. Фролов; заявитель и патентообладатель предприятие п/я м-5873, научно-исследовательский отдел -8320 предприятия п/я р-6115. № 3499259; заявл. 14.10.1982; опубл. 23.12.1983, Бюл. № 47. 2 с.

40.А. с. 1393496, СССР, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник для изготовления отводов / Ю.Б. Шувалов, В.А. Кочнов, Т.В. Розавнова, А.В. Эльцин; заявитель и патентообладатель государственный комитет по делам изобретений и открытий. № 3993861; заявл. 23.12.1985; опубл. 07.05.1988, Бюл. № 17. 2 с.

41. Пат. 213440, Российская федерация, МПК В21Д 9/12. Рогообразный сердечник / В.Я. Дуганов, Н.А. Архипова; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". № 2022113231; заявл. 17.05.2022; опубл. 12.09.2022, Бюл. № 26. 6 с.

Информация об авторах:

Баранов Денис Сергеевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: den-3218@yandex.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хуртасенко Андрей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: hurtint-bel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронкова Марина Николаевна, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: mkuzko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуганов Владимир Яковлевич, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Латышев Сергей Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: latser10@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.10.2024 г.

© Баранов Д.С., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., Дуганов В.Я., Латышев С.С., 2025

***Baranov D.S., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N., Duganov V.YA., Latyshev S.S.**

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

**E-mail: den-3218@yandex.ru*

THE PROBLEM OF PRODUCING SHARPLY BENT ELBOWS FROM HEAT-RESISTANT STEELS

Abstract. The article describes a sharp-bent elbow, its purpose, technical characteristics and parameters affecting the operational properties. Common types of elbows and methods of their manufacture are considered. A brief analysis of manufacturing methods is made. The optimal method for manufacturing sharp-bent elbows is determined, which is hot drawing on a horn-shaped core due to high productivity and minimal material waste.

The essence of the hot drawing method on a horn-shaped core is described, a diagram of the process of manufacturing a sharp-bent elbow is given. A generalized diagram of the design of a horn-shaped core consisting of a shank, a guide, a transition, a deforming and a calibrating part is given.

The problem of an enterprise that arises in the process of manufacturing sharp-bent elbows from heat-resistant steel and leads to premature failure of the equipment is described. Possible factors influencing the shaping process have been preliminarily determined, including: the material of the workpiece and core, temperature and force conditions, and the design and geometry of the core. The tasks have been formulated, the comprehensive solution of which can help eliminate the problem.

To partially solve the problem of determining the optimal design and geometry of the horn-shaped core, a patent analysis of the existing tooling, prototypes, and utility models was performed, and a brief description is provided.

Keywords: horn core, sharp bend, hot drawing, heat-resistant steels, tooling durability

REFERENCES

1. Presidential instructions. President of Russia. [Porucheniya prezidenta. Prezident Rossii]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/73759#assignment-8> (date accessed: 02.10.2024). (rus)
2. Khalevitsky Yu.V., Konovalov A.V. Methods for solving SLAE in finite element software packages modeling deformations of solids. Fundamental research. [Metody resheniya SLAU v konechno-elementnykh programmnykh kompleksakh, modeliruyushchih deformacii tvyordyh tel. Fundamental'nye issledovaniya]. 2015. No. 8-2. Pp. 338–344. (rus)
3. Timofeev S.P., Grinek A.V., Khurtasenko A.V., Boychuk I.P. Technology of mechanical processing, digital modeling and implementation of a device for controlling the shape of large-sized parts. Metal processing (technology, equipment, tools). [Tekhnologiya mekhanicheskoy obrabotki, cifrovoe modelirovanie i realizaciya ustrojstva dlya kontrolya formy krupnogabaritnykh detalej. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)]. 2022. Vol. 24, No. 2. Pp. 6–24. (rus)
4. Khurtasenko V.A., Shrubchenko A.V. Mathematical model for optimization of parameters of processing of rolling surfaces of technological units by mobile equipment. [Matematicheskaya model' dlya optimizacii parametrov obrabotki poverhnostej kacheniya tekhnologicheskikh agregatov mobil'nykh oborudovaniem]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 144–150. DOI 10.34031/article_5cb1e65b635e41.79569989 (rus)
5. Maryin B.N., Ivanov Yu.L., Makarov K.A., Muravyov V.I., Odinkoe V.I. Manufacturing of pipelines for hydraulic gas systems of aircraft. [Izgotovlenie truboprovodov gidrogazovykh sistem LA]. Moscow: Mechanical Engineering, 1998. 400 p. (rus)
6. Maryin B.N., Feoktistov S.I., Kolykhalov D.G., Kuriny V.V., Ivanov I.N. Study of combined processes in the manufacture of aircraft parts. Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. [Issledovanie sovmeshchennykh processov pri izgotovlenii detalej letatel'nykh apparatov. Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2016. Vol.1, No. 2(26). Pp. 34–41. (rus)

7. Tavastsherna R.I. Manufacturing and installation of process pipelines. [Izgotovlenie i montazh tekhnologicheskikh truboprovodov]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 286 p. (rus)
8. Bratukhin, A.G. Ivanov Yu.L. Modern technologies of aircraft construction: a textbook. [Sovremennye tekhnologii aviastroeniya: uchebnoe posobie]. Moscow: Mechanical Engineering, 1999. 832 p. (rus)
9. Stamped-welded bends. [Otvody shtamposvarnye. PCF]. URL: <https://www.metelelement.ru/catalog/otvody/shtamposvarnye-otvody/> (date of access: 02.10.2024). (rus)
10. Sectional welded bends. [Otvody sekcionnye svarnye. REMMASHGRUPP]. URL: <https://remmg.ru/service/otvody-sekcionnye-svarnye/> (date accessed: 02.10.2024). (rus)
11. Turned bends (elbows) Silver World 2000. [Otvody tochenye (ugol'niki). Serebryanyj mir 2000]. URL: <https://www.sm2000.ru/katalog-detaley-truboprovodov/detali-truboprovodov/otvodi/otvodi-tochenie-ugolyniki> (date of access: 02.10.2024). (rus)
12. Bent bends p everything you need to know. Avangard. [Gnutye otvody - vse chto nuzhno znat'. Avangard] URL: <https://www.polycoat.ru/about/articles/gnutye-otvody-vse-chto-nuzhno-znat.html> (date accessed: 02.10.2024). (rus)
13. Galperin A.I. Machines and equipment for pipe bending. [Mashiny i oborudovanie dlya gnut'ya trub]. Moscow: MASHGIZ, 1963. 156 p. (rus)
14. Shuvalov Yu.B. Hot drawing of sharply curved bends on hollow horn-shaped cores. Chemical and oil engineering. [Goryachaya protyazhka krutoizognutykh otvodov na polyh rogoobraznykh serdechnikah. Himicheskoe i neftyanoe mashinostroenie]. 1991. No. 2. Pp. 36–37. (rus)
15. Albov I.N. Bending of pipes with induction heating. Forging and stamping production. [Gnut'e trub s indukcionnym nagrevom. Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo]. 1963. No. 4. Pp. 21–27. (rus)
16. Feoktistov S.I., Maryin B.N., Maryin S.B., Kolykhalov D.G. Theory and practice of manufacturing elements of aircraft pipelines. [Teoriya i praktika izgotovleniya elementov truboprovodov letatel'nykh apparatov]. Komsomolsk-on-Amur: FGBOU VPO "KnAGTU", 2013. 88 p. (rus)
17. Gulyaev A.P. Metal Science. Textbook for Universities. 6th ed., revised and enlarged. [Metallovedenie. Uchebnik dlya vuzov. 6-e izd., pererab. i dop]. Moscow: Metallurgy, 1986. 544 p. (rus)
18. Makarov K.A., Maryin B.N., Petrov A.M. Study of the process of tapping and expanding tubular blanks on a horn-shaped core with heating. Forging and stamping production. [Issledovanie processa tibki-razdachi trubnykh zagotovok po rogoobraznomu serdechniku s nagrevom. Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo]. 1992. No. 5. Pp. 4–6. (rus)
19. Vitenberg A.S., Leontovich V.E. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 748582/25-8, 1964.
20. Vitenberg A.S., Grozin G.A. Horn-shaped core. Patent RF, no. 750771/25-27, 1965.
21. Ignatiev A.D. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 1784595, 1976.
22. Belkin N.M., Tolstykh V.S. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2825180, 1982.
23. Soloveichik V.A. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2956079, 1983.
24. Shuvalov Yu.B., Kurenkov V.A., Tavastsherna R.I., Kolevatov E.G., Reva I.L. Horn-shaped core. Patent RF, no. 4122021, 1988.
25. Nazarov V.I., Baranov S.V., Nokhrin V.D., Shatrov A.A., Kaburenkov A.M. Horn-shaped core. Patent RF, no. 3284389, 1982.
26. Kim G.P., Rubenchik Yu. I., Akmukhamev A.Kh., Frolov O.F., Feldman R.M. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2849993, 1981.
27. Slezovsky A.V. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2002768, 1977.
28. Slezovsky A.V. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 202361, 1976.
29. Pavlov V.I., Surin Yu.S., Kurenkov V.A., Tavastsherna R.I. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 2895322, 1981.
30. Kurenkov V.A., Tavastsherna R.I., Letnikov Yu.S., Reva I.L. Hollow horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 2689472, 1981.
31. Gaskel M.A., Shekhriladze I.G. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2384471, 1977.
32. Gudkov V.L., Letnikov Yu.S., Abrosov V.P., Ufimtsev A.P. Horn-shaped core for bending pipes. Patent RF, no. 2469089, 1978.
33. Maryin B.N. Horn-shaped core. Patent RF, no. 3658718, 1986.
34. Kiyamov A.M. Horn-shaped core for manufacturing bends with a central angle of no more than 90° from pipe blanks. Patent RF, no. 2047654, 1977.
35. Golenkin V.I., Sokov A.V., Vaulin V.I., Lazarev P.A., Ufimtsev A.P. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2495517, 1979.
36. Gorbunov M.N., Ershov V.I., Kashirin M.F., Kondratyev M.V., Polovtsev V.A. Horn-shaped core for the manufacture of steeply curved pipes. Patent RF, no. 2622476, 1979.
37. Maryin B.N. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 2715377, 1980.
38. Maryin B.N. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 2829538, 1981.

39. Maryin B.N., Bazhenov V.F., Frolov P.V. Horn-shaped core for manufacturing bends from tubular blanks. Patent RF, no. 3499259, 1983.

40. Shuvalov Yu.B., Kochnov V.A., Rozavnova

T.V., Eltsin A.V. Horn-shaped core for manufacturing bends. Patent RF, no. 3993861, 1988.

41. Duganov V.Ya., Arkhipova N.A. Horn-shaped core. Patent RF, no. 2022113231, 2022.

Information about the authors

Baranov, Denis S, Assistant. E-mail: den-3218@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Khurtasenko, Andrey V, PhD. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Voronkova Marina N, PhD. E-mail: mkuzko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Duganov Vladimir YA, PhD. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Latyshev Sergey S, PhD. E-mail: latser10@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received 03.10.2024

Для цитирования:

Баранов Д.С., Хуртасенко А.В., Воронкова М.Н., Дуганов В.Я., Латышев С.С. Проблема производства крутоизогнутых отводов из жаропрочных сталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 121–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-121-132

For citation:

Baranov D.S., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N., Duganov V.YA., Latyshev S.S. The problem of producing sharply bent elbows from heat-resistant steels. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 121–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-121-132

DOI: 10.34031/2071-7318-2054-10-4-133-143

***Чуев К.В., Дююн Т.А., Дуганов В.Я., Дегтярь А. Н., Кравченко В.М.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kirill.chuev@gmail.com

ИМИТАЦИОННОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВОГО КОЛЬЦА

Аннотация. Статья посвящена исследованию процесса извлечения бортового кольца из изношенных крупногабаритных автомобильных шин с использованием имитационного динамического моделирования. Проблема переработки шин рассматривается в контексте глобального экологического кризиса, связанного с накоплением твёрдых отходов, а также в аспекте повышения эффективности технологий утилизации. Основное внимание уделено анализу конструктивных и технологических параметров установки для извлечения бортового кольца, влияющих на максимальные напряжения и деформации. Разработаны математические модели, описывающие зависимость напряжений и деформаций в кольце от ширины щели мишени, ширины крюка оборудования и площади поперечного сечения кольца. В ходе исследования проведён полный трёхфакторный эксперимент второго порядка, построен ротatableльный центральный композиционный план, по которому определены ключевые зависимости и оптимальные параметры процесса. Построены 3D-графики, иллюстрирующие влияние факторов на механические характеристики кольца. Установлено, что минимизация ширины щели мишени и оптимальный подбор ширины крюка повышают эффективность процесса. Предложены рекомендации по модернизации оборудования, включая использование адаптивных мишеней и методов предварительного ослабления сцепления резины и металла, что позволит снизить энергозатраты и повысить эффективность переработки шин.

Ключевые слова: оборудование для утилизации резино-технических изделий (РТИ), переработка шин, крупногабаритные шины (КГШ), имитационное моделирование.

Введение. Утилизация изношенных автомобильных шин является одной из значительных экологических и технологических проблем современного общества. Ежегодно в мировом масштабе формируется свыше миллиарда единиц таких отходов, что создает значительное антропогенное воздействие на окружающую среду [1]. Неэффективные методы утилизации и хранения шин способствуют накоплению токсичных соединений в экосистемах, увеличению объемов твёрдых отходов на полигонах, а также повышению риска неконтролируемых возгораний, сопровождающихся выделением вредных веществ [2].

В условиях перехода к концепции экономики замкнутого цикла переработка изношенных шин рассматривается как перспективный путь решения указанных проблем. Ценные компоненты, содержащиеся в шинах, включая полимерные материалы, металлические элементы и текстильное армирование, могут быть извлечены и использованы повторно, что способствует снижению нагрузки на природные ресурсы и развитию экологически ориентированных технологий [3].

Особое значение приобретает разработка и внедрение высокоэффективных методов переработки, направленных на извлечение металлических компонентов, таких как металлический корд

и бортовое кольцо [4]. Это обусловлено их значительным потенциалом для повторного применения в металлургической, строительной и других отраслях промышленности.

В крупногабаритных автомобильных шинах металлические включения, в частности бортовое кольцо, представляют собой армирующую конструкцию, обеспечивающую прочность и жёсткость соединения шины с ободом колеса. Для эффективной переработки изношенных шин извлечение металлического бортового кольца является важным этапом, поскольку это позволяет снизить объём отходов, улучшить качество получаемой резиновой фракции и минимизировать экологический ущерб [5].

Существуют различные методы извлечения бортового кольца, которые зависят от конструкции шин и доступных технологий [6]. Одним из таких методов является термическое воздействие, при котором шина нагревается для ослабления связи между резиной и металлическим кольцом [7, 8]. Этот подход позволяет упростить процесс извлечения, однако требует тщательного контроля температуры и использования систем очистки газов для предотвращения выделения вредных веществ. Ещё одним технологически сложным, но эффективным методом является криогенная обработка [9]. В этом случае шина замораживается до сверхнизких температур, что делает резину хрупкой и облегчает её отделение

от металла, сохраняя при этом структуру металлического кольца.

Альтернативой может служить — гидравлический метод, предполагающий использование давления для разрыва связи между резиной и металлом [10]. Однако данный способ имеет ограниченную эффективность, особенно при работе с шинами сложной конструкции, и требует значительных энергозатрат. Более распространённым и практичным решением является механическое разделение. Этот метод включает использование специализированного оборудования, которое позволяет вырезать или вытягивать кольцо с минимальными повреждениями резиновой части изделия [11].

Выбор метода зависит от характеристик шин, масштабов переработки и особенностей используемого оборудования [12, 13, 14]. Оптимизация процессов извлечения металлических компонентов из шин представляет собой важное направление в развитии технологий переработки, способствующее снижению экологической нагрузки и улучшению переработки полимерных материалов.

Основная часть.

Цель исследования заключается в повышении эффективности процесса извлечения бортового кольца из изношенных крупногабаритных автомобильных шин путем оптимизации конструктивных и технологических параметров оборудования для переработки РТИ, а именно извлечения бортовых колец из борта шин. Для достижения цели необходимо проанализировать методы извлечения бортовых колец, разработать математическую модель процесса извлечения, провести имитационное динамическое моделирование, для нахождения оптимальных вариантов конструкции изделия.

Процесс удаления бортового кольца можно разделить на несколько этапов (рис. 1). Сначала колесо поступает в рабочую зону оборудования и подвешивается на крюк 2, шириной B (рис. 2а). Рабочий процесс начинается с захвата крюком 2 бортового кольца 3, после чего резиновый борт колеса 4 упирается в мишень 1, шириной s (рис. 2б). Когда достигается необходимая сила для извлечения кольца 3, крюк 2 постепенно вытягивает его через мишень 1 (рис. 2в), увеличивая расстояние l рабочего хода крюка. Рабочий цикл завершается полным извлечением бортового кольца из покрышки (рис. 2г).

Процесс извлечения бортового металлического кольца из резиновой оболочки представляет собой сложную задачу, которая требует

учета как физических, так и геометрических факторов. Металлическое кольцо находится в плотном контакте с резиновым материалом, что создает значительные силы трения, сцепления и адгезии между материалами [15]. Кроме того, геометрическая форма кольца и его расположение в резиновой оболочке усложняют процесс извлечения, особенно при наличии искривлений, локальных деформаций или разрывов.

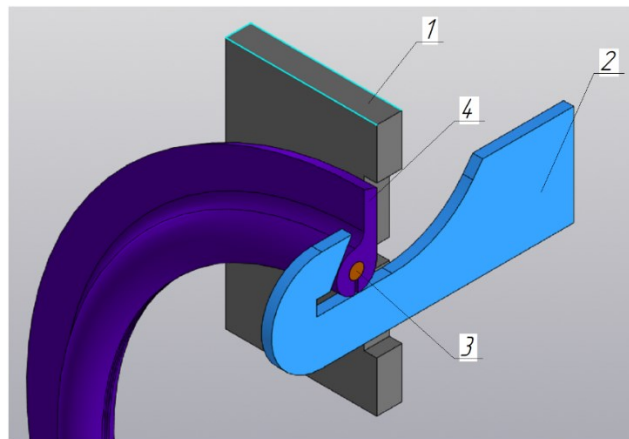


Рис. 1. Разрез модели процесса извлечения бортового кольца из шины: 1 — мишень; 2 — крюк; 3 — бортовое кольцо; 4 — резиновый борт шины

В общем виде баланс сил процесса удаления бортового кольца можно представить в виде уравнения (1):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \sum F_{kx} \rightarrow \begin{cases} x(t) \\ x(v) \rightarrow v(t, s) \\ x(t, v, s) \end{cases} \quad (1)$$

Силу, необходимую для извлечения бортового кольца, можно разложить на несколько составляющих (2):

$$\sum F_{kx} = F - F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (2)$$

где F_{kx} — усилие необходимое для извлечения бортового кольца, Н;

F — усилие, развиваемое оборудованием, Н

F_1 — усилия, необходимые для преодоления адгезии между стальной проволокой и резиновой оболочкой., Н;

F_2 — усилия, необходимые для разрыва резиновой оболочки бортовой части колеса., Н;

F_3 — усилие, затрачиваемое на деформацию бортового колеса, Н;

F_4 — усилия, необходимые для преодоления силы трения и других негативных факторов., Н;

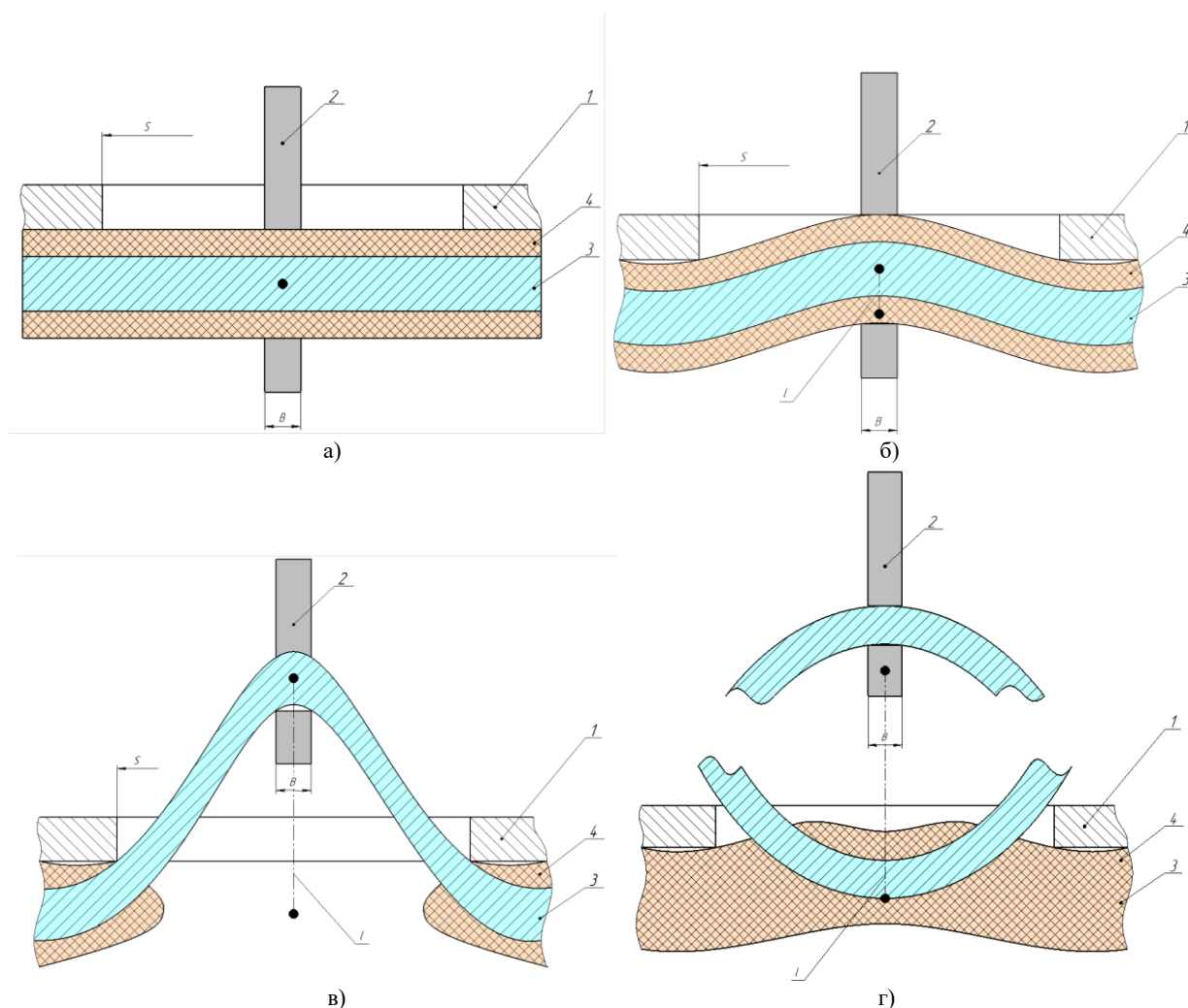


Рис. 2. Принципиальная схема процесса извлечения бортового кольца: а – исходное положение; б – начало рабочего процесса извлечения бортового кольца; в – рабочий процесс извлечения при достижении необходимого усилия; г – окончание процесса извлечения

Усилие на преодоление адгезии (F_1) — связано с преодолением сил сцепления между металлической поверхностью кольца и резиновой оболочкой. Адгезионные силы зависят от качества контакта материалов, их химической совместимости и наличия защитных или соединительных покрытий (например, латунного слоя на проволоке).

Усилие по разрыву резиновой части борта шины (F_2) — возникает при повреждении и разрушении резиновой оболочки вследствие извлечения металлического бортового кольца. Это усилие определяется прочностью резины на разрыв, её деформационной способностью, толщиной резиновой оболочки и толщиной бортового кольца.

Деформационные усилия (F_3) — обусловлены сопротивлениями резинового борта и стальной проволоки, которые обладают упругостью и стремятся восстановить свою форму. Эти усилия зависят от физико-механических характеристик резины и стали, таких как жесткость, модуля

упругости и геометрических параметров, таких как площадь поперечного сечения резинового борта и бортового кольца.

Усилия, затрачиваемые на преодоление вредных факторов (F_4) — включают дополнительные нагрузки, вызванные загрязнениями, коррозией металлического кольца, а также заклиниванием кольца в результате деформаций или повреждений.

Проволока бортовых колец в шинах — это высокопрочная стальная проволока, которая используется для армирования бортов шин, чтобы выдерживать значительные нагрузки, возникающие при монтаже шины на обод и её эксплуатации под давлением. Для изготовления проволоки бортовых колец шин используются высокоуглеродистые или легированные стали обладающие высокой упругостью, пределом прочности, устойчивостью к коррозии и деформации. Проволока часто покрывается латунным или цинковым слоем, чтобы улучшить сцепление с резиной и защитить от коррозии.

Основные физико-механические характеристики проволоки отражены в ГОСТ 14959-79 и

ГОСТ 26366-84 и имеют свойства, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики проволоки		
Наименование	Обозначение	Значение
Предел прочности при растяжении	(σ_B)	1500–2000 МПа
Предел текучести	($\sigma_{0.2}$)	1200–1800 МПа
Модуль упругости	(E)	200 ГПа
Коэффициент Пуассона	(ν)	0,27–0,3
Удлинение при разрыве	(δ)	2–4%
Твердость в диапазоне	-	450–550 HV
Диаметр проволоки	d	0,9 - 2,0 мм

Для оптимизации процесса извлечения бортового кольца из шин и разработки рекомендаций по модернизации оборудования был проведен полный трёхфакторный эксперимент второго порядка. Для этого был построен ротатбельный центральный композиционный план второго порядка [16]. Выходным параметром функции отклика $[\sigma]$, $Dx = f(s, b, A_{бк})$ является значение максимального напряжения, возникающего в элементах по Мизесу ($[\sigma]$, МПа) и максимальное значение деформации (Dx , мм). В качестве факторов эксперимента выбраны: ширина щели ми-

шени в упорной плите оборудования (s , мм), ширина крюка оборудования – (b , мм) и площадь поперечного сечения бортового кольца ($A_{бк}$, мм²).

Для получения ЦКП второго порядка для трех факторов, к полному факторному эксперименту («ядру» плану, точки 1-8) добавляют шесть «звездных» точек (точки 9-14) с координатами $(+\alpha; 0; 0)$; $(-\alpha; 0; 0)$; $(0; +\alpha; 0)$; $(0; -\alpha; 0)$; $(0; 0; +\alpha)$; $(0; 0; -\alpha)$ и точку 15 в центре плана В соответствии с изменяемыми факторами и схемой трехфакторного пространства (рисунок 3) была построена таблица 2 с условиями эксперимента.

Таблица 2

Условия экспериментов

Обозначение факторов		Уровни факторов										Интервалы варьирования факторов
		“Звёздный +”		Верхний		Основной		Нижний		“Звёздный -”		
натуральное	кодирование	натуральное	кодированное	натуральное	кодированное	натуральное	кодирование	натуральное	кодированное	натуральное	кодированное	
s , мм	x_1	351,2	+a	300	+1	225	0	150	-1	98,85	-a	75
b , мм	x_2	36,82	+a	30	+1	20	0	10	-1	3,18	-a	10
$A_{\delta \nu}$, мм ²	x_3	488,2	+a	420	+1	320	0	220	-1	151,8	-a	100

Для перехода от кодированных значений к натуральным следует использовать формулу:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{\Delta x_i} \quad (3)$$

где $x_i = \pm 1,68; \pm 1; 0$ – кодированное значение i -го фактора;

$\tilde{x}_i$ – натуральное значение i -го фактора;

$\tilde{x}_i^0$ – натуральное значение основного уровня i -го фактора;

Δx_i – интервал варьирования i -го фактора,

$\Delta x_i = \frac{1}{2}(\tilde{x}_{i \max} - \tilde{x}_{i \min})$;

$\tilde{x}_{i \max} - \tilde{x}_{i \min}$ – натуральные значения верхнего и нижнего уровней i -го фактора.

В таблице 3 представлена матрица ротатбельного равномер-планирования второго порядка применительно к задачам исследования.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить расчёты, включающие в себя оценку усилия, необходимого для извлечения бортового кольца, напряжений, возникающих в бортовом кольце, а также конструктивных параметров установки и технологических характеристик бортового кольца. Для этого был использован метод конечных элементов. В ходе исследования был построен ряд параметрических моделей, на которые в дальнейшем была наложена конечно-элементная сетка, применены ограничения и приложены нагрузки (рис. 4).

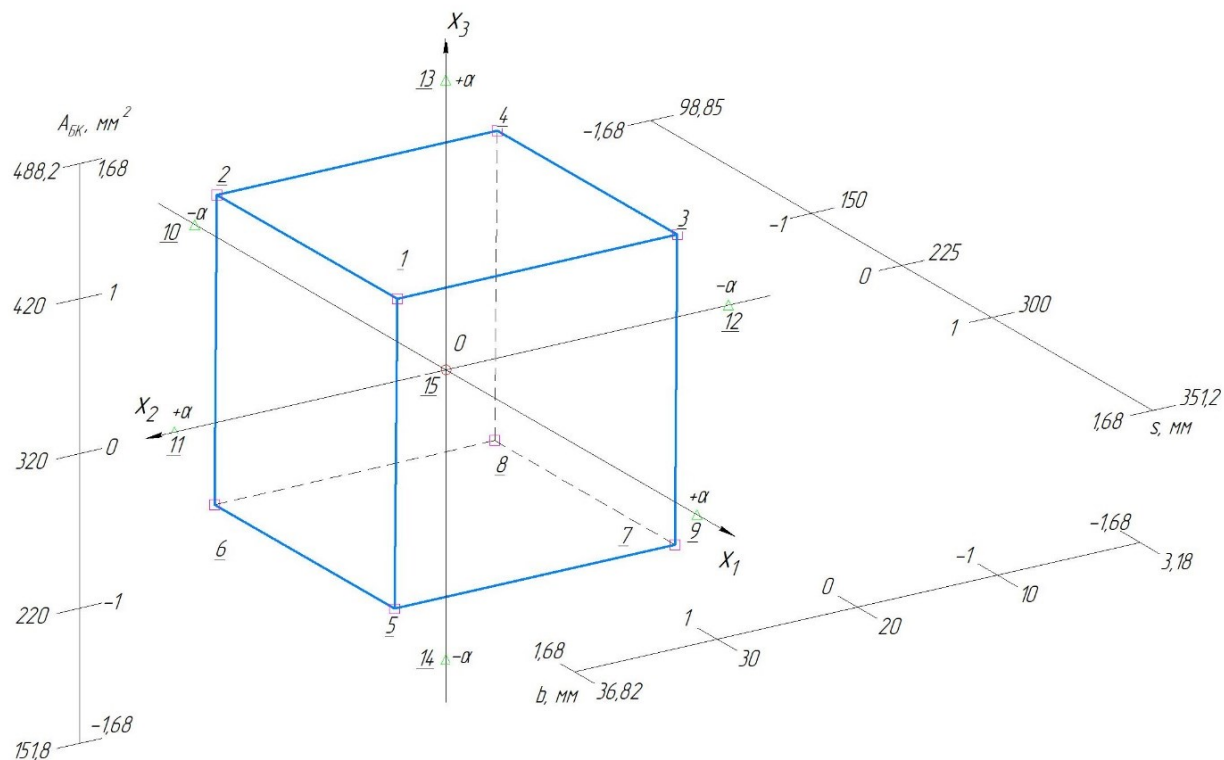


Рис 3. Схема трехфакторного пространства для ЦКП второго порядка

Таблица 3

Матрица рототабельного униформ-планирования второго порядка

№ оп		x_0	x_1	$\widetilde{x}_1$	x_2	$\widetilde{x}_2$	x_3	$\widetilde{x}_3$	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y1, МПа	Y2, мм
«Ядро» плана	1	+	+	300	+	30	+	420	+	+	+	+	+	+	5857	12,08
	2	+	-	150	+	30	+	420	+	-	-	+	+	+	2811,1	2,044
	3	+	+	300	-	10	+	420	-	+	-	+	+	+	7577	12,2
	4	+	-	150	-	10	+	420	-	-	+	+	+	+	3614,98	2,126
	5	+	+	300	+	30	-	220	-	-	+	+	+	+	14796,2	42,82
	6	+	-	150	+	30	-	220	-	+	-	+	+	+	8099,7	6,82
	7	+	+	300	-	10	-	220	+	-	-	+	+	+	17293,7	43,33
	8	+	-	150	-	10	-	220	+	+	+	+	+	+	8992,1	7,05
Звездные точки	9	+	+1.68	351,2	0	20	0	320	0	0	0	2,83	0	0	10694,4	31,58
	10	+	-1.68	98,85	0	20	0	320	0	0	0	2,83	0	0	3326,61	1,33
	11	+	0	225	+1.68	36,8	0	320	0	0	0	0	2,83	0	6322,3	9,31
	12	+	0	225	-1.68	3,18	0	320	0	0	0	0	2,83	0	8012,8	9,64
	13	+	0	225	0	20	+1.68	488,2	0	0	0	0	0	2,83	3910,6	4,18
	14	+	0	225	0	20	-1.68	151,8	0	0	0	0	0	2,83	21504	40,11
15	+	0	225	0	20	0	320	0	0	0	0	0	0	6875,6	9,49	

Упорная плита выполнена в виде параллелепипеда с сквозным параметризованным пазом, имитирующим щель мишени длиной s . Плита жёстко зафиксирована в пространстве с помощью ограничения: жёсткая заделка.

Бортовое кольцо выполнено в виде стержня с изменяемым поперечным сечением, A_{bk} . С двух

сторон бортовое кольцо ограничено цилиндрическим шарниром без возможности поворота и перемещения в радиальном направлении, но с возможностью перемещения в осевом направлении. К бортовому кольцу, в зависимости от толщины крюка В, приложена распределённая нагрузка ($F = 185 \text{ кН}$), равная среднему усилию извлечения

бортового кольца из борта шины при проведении натурного эксперимента [17].

Для моделирования соприкосновения опорной плиты и бортового кольца применён объект

симуляции — контакт "поверхность-поверхность".

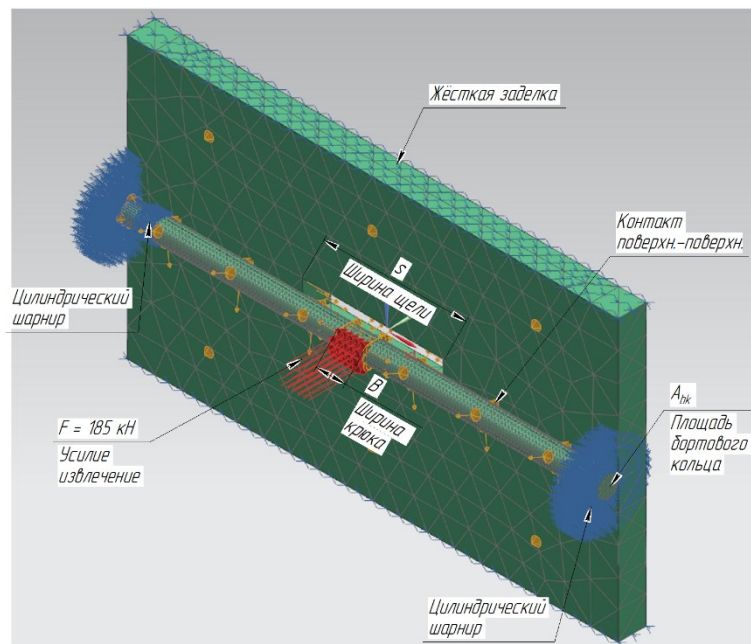


Рис 4. КЭ модель бортового кольца с упорной плитой в сборе с наложенными ограничениями, нагрузками и объектами симуляции

В ходе исследования были вычислены конечно-элементные модели с двумя необходимыми параметрами (рис. 5), которые были добавлены в таблицу 2 в качестве выходных данных.

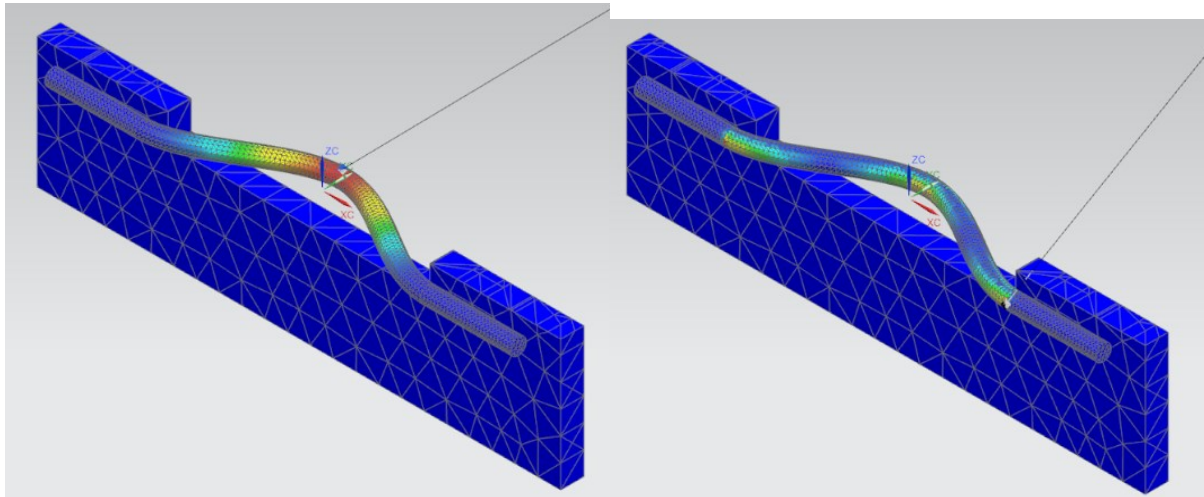


Рис 5. Результаты КЭ анализа при проведении 14 опыта

Для нахождения математических зависимостей максимального напряжения ($[\sigma]$, МПа) и максимальной деформации (Dx , мм), возникающих в бортовом кольце, от ширины щели мишени (s , мм), ширины крюка оборудования (b , мм) и площади поперечного сечения бортового кольца ($A_{бк}$, мм²) необходимо найти коэффициенты регрессии. Так как матрица планирования ротационного эксперимента не ортогональна, то коэффициенты регрессии определяют по формулам (4-7)

Свободный член:

$$b_0 = \frac{A}{N} [2\lambda^2 (k+2) \sum_{j=1}^N y_i - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j] \quad (4)$$

Коэффициенты при линейных членах:

$$b_i = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_i \quad (5)$$

Коэффициенты при парных взаимодействиях:

$$b_{il} = \frac{c^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_i \quad (6)$$

Коэффициенты при квадратичных членах:

$$b_{ii} =$$

$$\frac{A}{N} \{c^2[(k+2)\lambda - k] \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + c^2(1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j\} \quad (7)$$

где i – номер столбца матрицы; j – номер опыта; x_{ij} – элемент соответствующего столбца матрицы; y_j – значение выходного параметра в j – том опыте; N – число опытов ($N = 15$); k – кол-во факторов ($k = 3$); табулированные константы, для $k = 3$ $\lambda = 0,858$; $A = 0,452$; $c = 1,464$;

После обработки данных эксперимента были получены уравнения регрессии в закодированном виде для максимального напряжения ($[\sigma]$, Мпа) (8) и максимальной деформации (Dx , мм) (9):

$$Y_1 = 10382,7 + 2516,9 \cdot x_1 - 640,8 \cdot x_2 - 4309,9 \cdot x_3 - 314,9 \cdot x_1 \cdot x_2 - 997,9 \cdot x_1 \cdot x_3 + 108,2 \cdot x_2 \cdot x_3 + 2043,1 \cdot x_1^2 + 2098,7 \cdot x_2^2 + 4057,9 \cdot x_3^2 \quad (8)$$

$$Y_2 = -21,4 + 10,5 \cdot x_1 - 0,1 \cdot x_2 - 9,7 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_1 \cdot x_2 - 6,5 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,07 \cdot x_2 \cdot x_3 + 6,1 \cdot x_1^2 + 3,7 \cdot x_2^2 + 8,1 \cdot x_3^2 \quad (9)$$

После раскодирования уравнения (8) и (9) принимают вид (10) и (11), соответственно.

$$[\sigma] = 56696,62 - 78,873 \cdot s + 6,516 \cdot b - 274,03 \cdot A_{\text{БК}} - 0,42 \cdot s \cdot b - 0,13 \cdot s \cdot A_{\text{БК}} + 0,11 \cdot b \cdot A_{\text{БК}} + 0,36 \cdot s^2 + 20,99 \cdot b^2 + 0,41 \cdot A_{\text{БК}}^2 \quad (10)$$

$$D_x = 68,1 - 0,21 \cdot s - 1,29 \cdot b - 0,32 \cdot A_{\text{БК}} - 0,000053 \cdot s \cdot b - 0,000867 \cdot s \cdot A_{\text{БК}} + 0,00007 \cdot b \cdot A_{\text{БК}} + 0,0011 \cdot s^2 + 0,04 \cdot b^2 + 0,00081 \cdot A_{\text{БК}}^2 \quad (11)$$

Ширина крюка (b) оказывает умеренное влияние на напряжение $[\sigma]$ и деформацию Dx , главным образом через распределение нагрузки на бортовое кольцо. Увеличение b снижает концентрацию напряжений, так как нагрузка распределяется на большую площадь, что уменьшает риск повреждений кольца. При слишком малой ширине ($b \rightarrow 7$ мм) напряжение и деформация возрастают из-за высокой концентрации сил на малой площади контакта. Оптимальное значение ширины крюка ($b=20$ мм) обеспечивает баланс

между минимальными напряжениями и умеренными деформациями, тогда как увеличение b выше 30 мм незначительно влияет на процесс и приводит к избыточным конструктивным затратам.

Зависимости максимального напряжения $[\sigma]$ и максимальной деформации Dx возникающих в бортовом кольце, от ширины щели мишени s и площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{БК}}$ при фиксированной ширине крюка $b=20$ мм представлены в виде 3D графиков на рис. 6.

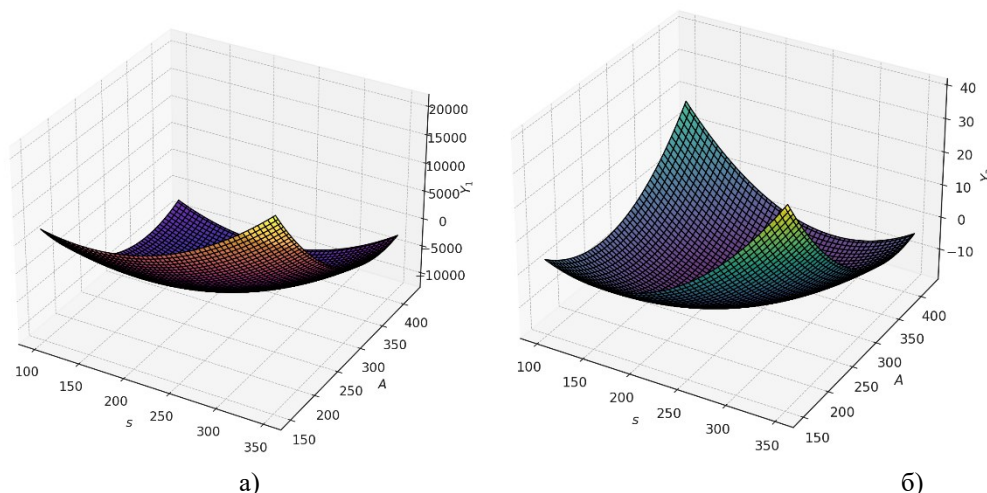


Рис 6. 3D графики зависимостей максимального напряжения $[\sigma]$ (а) и максимальной деформации Dx (б), возникающих в бортовом кольце при фиксированном значении ширины крюка оборудования $b = 20$ мм

Фактор s – ширина щели значительно влияет на оба параметра. Увеличение s ведёт к росту напряжений $[\sigma]$, аналогично, растёт и деформация Dx , но более плавно. С увеличением фактора $A_{\text{БК}}$ напряжение $[\sigma]$ растёт, что связано с изменением геометрических характеристик кольца, а деформация Dx увеличивается менее резко, так как увеличение $A_{\text{БК}}$ повышает жёсткость системы.

Для оптимизации процесса извлечения бортового кольца из изношенных шин рекомендуется минимизировать ширину щели мишени (s), либо применить адаптивную мишень с регулируемой шириной щели, что позволит учитывать геометрические параметры различных шин. Для уменьшения адгезии между бортовым кольцом и резиновым покрытием целесообразно применять

предварительное ослабление сцепления кольца и резины с помощью термической обработки, ультразвука или криогенного воздействия перед механическим извлечением. Для уменьшения сил трения целесообразно применять материалы мишени с низким коэффициентом трения.

Вывод. Проведенное имитационное динамическое исследование показало, что процесс извлечения бортового кольца из изношенных шин значительно зависит от ширины щели мишени (s), ширины крюка оборудования (b) и площади поперечного сечения кольца ($A_{\text{БК}}$), которые влияют на величины напряжений и деформаций. Увеличение s приводит к росту напряжений и деформаций, причём напряжения растут более интенсивно, что связано с концентрацией нагрузки. Увеличение $A_{\text{БК}}$ повышает напряжение за счёт увеличения жёсткости кольца, но менее существенно влияет на деформацию. Ширина крюка (b) играет ключевую роль в распределении нагрузки: при $b = 20$ мм достигается оптимальный баланс между минимальными напряжениями и умеренными деформациями, тогда как меньшие значения b увеличивают риск повреждений кольца. Оптимизация геометрических параметров оборудования, снижение сил трения и адгезии, а также использование предварительных методов ослабления связи между кольцом и резиной позволяют значительно повысить эффективность процесса и сохранить целостность извлекаемых компонентов. Результаты могут быть применены для разработки энергоэффективных технологий переработки шин, способствующих снижению экологической нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. De S.K., Isayev A., Khait K. Rubber Recycling. CRC Press, 2005. 528 p DOI:10.1201/9780203499337.
2. Zheng X., Pramanik A., Basak A.K., Prakash C. Material Recovery and Recycling of Waste Tyres—A Review // Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. 100115. DOI:10.1016/j.clema.2022.100115.
3. Вольфсон С.И., Фафурина Е.А., Фафурин А.В. Методы утилизации шин и резинотехнических изделий // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №1. С. 45–52.
4. Formela K. Sustainable Development of Waste Tires Recycling Technologies: Recent Advances, Challenges and Future Trends // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. Vol. 4, Issue 3. Pp. 209–222. DOI:10.1016/j.aiepr.2021.06.004.
5. Чуев К.В. Предварительная разделка изношенных шин // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 45–48. EDN ZQTXNH.
6. Дуганов В.Я., Дуюн Т.А., Чуев К.В., Архипова Н. А., Кравченко В. М., Чуева Ю. А. Проблемы утилизации крупногабаритных автомобильных шин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 11. С. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112
7. Макаров А.В. Некоторые аспекты рециклинга изношенных автомобильных покрышек методом пиролиза // Вестник ТОГУ. 2008. С. 247–258.
8. Яцун А.В., Коновалов П.Н., Коновалов Н. П. СВЧ-пиролиз изношенных автомобильных шин в присутствии гидроксида калия // Современные наукоемкие технологии. 2017. С. 83–87.
9. Бондаренко Е.В., Клищенко В.П., Пославский А.П., Сорокин В.В. Формирование энергоэффективной технологии утилизации автомобильных шин // Мир транспорта и технологических машин. 2011. С. 47–52.
10. Пат. 2317195 С1, Российская Федерация, МПК В29В 17/02. Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации: / А. М. Горлачев, В. Н. Калмыков, В. И. Фарафонов; заявитель ООО НПП "ИнТехОс-ТМЗ". № 2006118174/12: заявл. 29.05.2006: опубл. 20.02.2008.
11. Пат. 201698, Российская Федерация, МПК В29В 17/02. Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации: / В.Я. Дуганов, Н.А. Архипова, К.В. Чуев, Ю.А. Чуева; заявитель ФГБОУ ВО «БГТУ им. Шухова» № 2020133204 : заявл. 08.10.2020 : опубл. 28.12.2020
12. Чуев К. В., Кравченко В. М., Мutowалов Э. А. Основные виды утилизации резинотехнических изделий // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. С. 49–52.
13. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K.K. Improvement of the Organization of Maintenance and Repair of Dump-Cars // Material and Mechanical Engineering Technology. 2020. №1. Pp. 33–38. DOI:10.17580/gzh.2022.04.15.
14. Bochkaryov Y., Ishkov A. The Operational Reliability of Quarry Dump Trucks BELAZ-7540 in the Placer Deposits // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325–332. DOI:10.5593/sgem2020/1.2/s03.042.
15. Лучин И.В., Кравченко И.М., Конкин М.Ю. Методика расчета процесса разрушения

изношенных автомобильных шин и резинотехнических изделий при утилизации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8.4. С. 11–15.

16. Симогин А.А. Применение планирования эксперимента при построении математической модели в области оптимума // Сборник научно-методических работ. Том 11. Донецк: Донецкий

национальный технический университет, 2019. С. 195–202. EDN GESOAG.

17. Чуев К.В. Технологические аспекты извлечения металлических компонентов из резинотехнических изделий // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2024. № 12. С. 106–115. DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-12-106-115. EDN DCQCSK.

Информация об авторах

Чуев Кирилл Витальевич, аспирант кафедры технология машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технология машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуганов Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения. E-mail: dvuybgtu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дегтярь Андрей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: andrey-dandr@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кравченко Владимир Михайлович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: livenes.vova@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.01.2025 г.

© Чуев К.В., Дуюн Т.А., Дуганов В.Я., Дегтярь А.Н., Кравченко В.М., 2025

***Chuev K.V., Duyn T.A., Duganov V.Y., Degtyar A.N., Kravchenko V.M.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**kirill.chuev@gmail.com*

SIMULATION-BASED DYNAMIC MODELING OF THE BEAD WIRE EXTRACTION PROCESS

Abstract. The article focuses on investigating the bead wire extraction process from used large-sized automotive tires using simulation-based dynamic modeling. The issue of tire recycling is considered in the context of the global ecological crisis associated with the accumulation of solid waste. The study substantiates the need for efficient tire recycling technologies, including the extraction of metal components such as the bead wire, which contributes to reducing environmental impact and promoting a circular economy. Special attention is given to analyzing the structural and technological parameters of the equipment used for bead wire extraction. Mathematical models describing the dependence of maximum stresses and deformations in the wire on the slot width of the target, hook width, and cross-sectional area of the wire are presented. Key dependencies are experimentally confirmed, and 3D graphs demonstrating the influence of factors on the strength and deformation characteristics of the wire are constructed. Recommendations for optimizing the process to enhance the efficiency of metal component extraction are proposed.

Ключевые слова: equipment for recycling rubber products, tire recycling, large-size tires (LST), simulation modeling.

REFERENCES

1. De S.K., Isayev A., Khait K. Rubber Recycling. CRC Press, 2005. DOI: 10.1201/9780203499337.

2. Zheng X., Pramanik A., Basak A.K., Prakash C. Material Recovery and Recycling of Waste Tyres—A Review. Cleaner Materials. 2022. Vol. 5. 100115. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100115..

3. Wolfson S.I., Fafurina E.A., Fafurin A.V. Methods of recycling tires and rubber products [Metody utilizatsii shin i rezinotekhnicheskikh izdeliy]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2011. No. 1. Pp. 45–52. (rus)
4. Formela K. Sustainable Development of Waste Tires Recycling Technologies: Recent Advances, Challenges and Future Trends. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. Vol. 4, Issue 3. Pp. 209–222. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004.
5. Chuev K.V. Preliminary shredding of worn tires [Predvaritel'naya razdelka iznoshennykh shin]. Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo: Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnogo molodyozhnogo foruma, Belgorod, 23–24 oktyabrya 2023 goda. – Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova, 2023. Pp. 49–52. (rus)
6. Duganov V.Ya., Dyun T.A., Chuev K.V., Arkhipova N.A., Kravchenok V.M., Chueva Yu.A. Problems of recycling large-size tires [Problemy utilizatsii krupnogabaritnykh avtomobil'nykh shin]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 103–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112. (rus)
7. Makarov A.V. Some aspects of recycling worn tires by pyrolysis [Nekotorye aspekty retsiklinga iznoshennykh avtomobil'nykh pokryshok metodom piroliza]. Vestnik TOGU. 2008. Pp. 247–258. (rus)
8. Yatsun A.V., Konovalov P.N., Konovalov N. P. Microwave pyrolysis of worn tires in the presence of potassium hydroxide [SVCh-piroliz iznoshennykh avtomobil'nykh shin v prisutstviy gidroksida kaliya]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2017. Pp. 83–87. (rus)
9. Bondarenko E.V., Klishchenko V.P., Poslavskiy A.P., Sorokin V.V. Formation of an energy-efficient technology for recycling tires [Formirovanie energooeffektivnoy tekhnologii utilizatsii avtomobil'nykh shin]. Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2011. Pp. 47–52. (rus)
10. Duganov V.Ya., Arkhipova N.A., Chuev K.V., Chueva Yu.A. Ustanovka dlya udaleniya trosy iz bokovoy chasti shiny pri utilizatsii. Patent RF, no. 201698, 2020. (rus)
11. Gorlachiev A.M., Kalmykov V.N., Farafonov V.I. Ustanovka dlya udaleniya trosy iz bokovoy chasti shiny pri utilizatsii. Patent RF, no. 2317195 C1, 2008. (rus)
12. Chuev K.V., Kravchenko V.M., Mutovalov E.A. Main types of recycling rubber products [Osnovnye vidy utilizatsii rezinotekhnicheskikh izdeliy]. Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo: Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnogo molodyozhnogo foruma, Belgorod, 23–24 oktyabrya 2023 goda. – Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V. G. Shukhova, 2023. Pp. 49–52. (rus)
13. Zhetesova G.S., Dandybaev E.S., Zhunuspekov D.S., Zhekibaeva K. K. Improvement of the Organization of Maintenance and Repair of Dump-Cars. Material and Mechanical Engineering Technology. 2020. № 1. Pp. 33–38. DOI: 10.17580/gzh.2022.04.15.
14. Bochkaryov Y., Ishkov A. The Operational Reliability of Quarry Dump Trucks BELAZ-7540 in the Placer Deposits. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Pp. 325–332. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.042.
15. Luchin I.V., Kravchenko I.M., Konkin M.Yu. Methodology for calculating the process of destruction of worn tires and rubber products during recycling [Metodika rascheta protsessa razrusheniya iznoshennykh avtomobil'nykh shin i rezinotekhnicheskikh izdeliy pri utilizatsii]. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalkh issledovaniy. 2014. No. 8.4. Pp. 11–15. (rus)
16. Simogin A.A. Application of experimental planning in constructing a mathematical model in the field of optimum [Primenenie planirovaniya eksperimenta pri postroenii matematicheskoy modeli v oblasti optimuma]. Sbornik nauchno-metodicheskikh rabot. Tom 11. – Donetsk: Donetskii natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2019. Pp. 195–202. EDN GESOAG. (rus)
17. Chuev K. V. Technological aspects of extracting metal components from rubber products [Tekhnologicheskie aspekty izvlecheniya metallicheskikh komponentov iz rezinotekhnicheskikh izdeliy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 106–115. DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-12-106-115. EDN DCQCCK. (rus)

Information about the authors

Chuev, Kirill V. Postgraduate student. E-mail: kirill.chuev@gmail.com Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dyun, Tatiana A. Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duganov, Vladimir Y. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: dvybgtu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Degtyar, Andrei N. Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials. E-mail: andrey-dandr@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kravchenko, Vladimir M. Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: liv-nec.vova@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.01.2025

Для цитирования:

Чуев К.В., Дуюн Т.А., Дуганов В.Я., Дегтярь А.Н., Кравченко В.М. Имитационное динамическое моделирование процесса извлечения бортового кольца // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 4. С. 133–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-133-143

For citation:

Chuev K.V., Duyn T.A., Duganov V.Y., Degtyar A. N., Kravchenko V.M. Simulation-based dynamic modeling of the bead wire extraction process. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 4. Pp. 133–143. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-4-133-143